ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(РОСГИДРОМЕТ)

# ТРЕТИЙ ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД

## ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2022

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(РОСГИДРОМЕТ)

# ТРЕТИЙ ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2022

УДК 551.58
ББК 26.237
Т66

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2022. – 676 с.

**Научно-координационный комитет по подготовке "Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации":**
Руководитель Росгидромета И. А. Шумаков (председатель), заместитель Руководителя Росгидромета В. В. Соколов (заместитель председателя), А. И. Бедрицкий, Т. М. Дмитриева, В. А. Долгий-Трач, С. А. Журавлев, академик РАН А. Л. Иванов, И. В. Ивачев, академик РАН Н. С. Касимов, В. М. Катцов, В. С. Косых, А. С. Макаров, академик РАН И. И. Мохов, академик РАН Б. Н. Порфирьев, член-корреспондент РАН А. А. Романовская, И. Н. Шанина (секретарь)

**Головное научное учреждение Росгидромета по подготовке доклада:**
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (Климатический центр Росгидромета)

"Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации" состоит из **основного тома и Общего резюме.**

Настоящий **основной том "Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации"** подготовили специалисты научно-исследовательских институтов Росгидромета и Минобрнауки России, а также других учреждений:

**научный руководитель работ по подготовке доклада** *В. М. Катцов*

**ведущие авторы доклада** *Е. М. Акентьева, О. А. Анисимов, М. Ю. Бардин, С. А. Журавлев, В. М. Катцов, А. А. Киселев, М. В. Клюева, П. И. Константинов, В. Н. Коротков, А. Г. Костяной, О. Н. Липка, А. С. Макаров, В. П. Мелешко, В. Н. Павлова, Т. В. Павлова, А. А. Постнов, Е. Н. Разова, Б. А. Ревич, член-корреспондент РАН С. В. Рязанцев, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник, В. В. Ясюкевич*

**и авторы доклада** *Е. М. Акентьева, А. М. Алейникова, Г. В. Алексеев, В. М. Амосова, М. Д. Ананичева, А. П. Андреева, О. А. Анисимов, Н. М. Аржанова, Д. Ф. Афанасьев, С. В. Бадина, А. А. Бакланов, Ж. А. Балонишникова, В. В. Барабанов, М. Ю. Бардин, В. Н. Белоусов, А. Ю. Богданович, М. И. Варенцов, В. Ю. Вертянкина, Е. В. Волощук, С. Ю. Гаврилова, В. Ю. Георгиевский, А. И. Гинзбург, В. А. Говоркова, С. М. Гордеева, Г. В. Груза, С. Г. Давлетшин, А. И. Данилов, Т. В. Дементьева, М. Д. Докукин, А. В. Долгов, Т. Р. Еремина, С. В. Жукова, С. А. Журавлев, В. А. Задворных, Д. Г. Замолодчиков, А. С. Зезера, А. Н. Золотокрылин, Ю. И. Зуенко, В. В. Иванов, В. М. Ивахов, Г. Э. Инсаров, А. С. Калугин, М. В. Клюева, А. В. Константинов, М. Д. Корзухин, Н. Н. Коршунова, А. С. Кровнин, С. В. Крыленко, И. Н. Курганова, Е. Г. Лардыгина, С. А. Лебедев, О. Н. Липка, В. Б. Лобанов, А. С. Лукьянец, В. А. Лучин, Л. И. Мезенцева, В. П. Мелешко, А. В. Михайлова, Е. М. Моисеева, Г. Н. Огуреева, В. Н. Павлова, Т. В. Павлова, Н. Н. Парамонова, Г. Б. Пигольцина, А. А. Пикалева, Т. В. Платова, А. Е. Платонов, Е. Н. Попова, В. П. Разинков, Е. Н. Разова, Э. Я. Ранькова, И. Д. Ростов, Ю. Л. Рудакова, Е. Н. Русина, Е. П. Самойлова, О. Ф. Самохина, И. В. Серых, А. А. Сирин, С. А. Солдатенко, А. А. Соломатникова, П. В. Спорышев, В. В. Стадник, В. С. Столбовой, Н. Е. Терентьев, О. О. Трусенкова, Е. И. Устинова, Д. В. Фасолько, Г. В. Хен, Е. И. Хлебникова, А. В. Чернокульский, С. С. Чернянский, С. И. Шамин, А. Б. Шерстюков, Б. Г. Шерстюков, И. М. Школьник*

**Рецензенты:** *В. А. Анисимов (гл. 2.3.6), Е. Н. Букварева (гл. 2.1.1), Е. М. Володин (гл. 1.2.2), Е. Г. Гашо (гл. 2.3.5), член-корреспондент РАН А. Н. Гельфан (гл. 2.3.3), А. С. Гинзбург (разд. 3.2), В. А. Гневашева (гл. 2.2.1 и 2.2.2), член-корреспондент РАН С. К. Гулев (разд. 1.1), А. В. Елисеев (гл. 2.1.1 и 2.3.8), О. Г. Золина (гл. 1.2.1), Ю. А. Лагунова (гл. 2.3.1), В. Н. Лексин (разд. 3.3), член-корреспондент РАН Н. В. Лукина (гл. 2.3.4), С. М. Малхазова (гл. 2.2.3), А. А. Павловский (разд. 3.1), Н. М. Пестерева (гл. 2.3.10), член-корреспондент РАН А. Б. Полонский (гл. 1.2.1), академик РАН И. Ю. Савин (гл. 2.1.2), академик РАН В. А. Семенов (разд. 3.3), Г. И. Сидоренко (гл. 2.3.5), Н. П. Умнякова (гл. 2.3.7), С. Ю. Чайка (гл. 2.2.4), С. М. Шаповалов (гл. 2.1.3 и 2.3.9), академик РАН В. П. Якушев (гл. 2.3.2)*

**Редакционная группа** *А. А. Киселев, Е. Л. Махоткина, Т. В. Павлова*

Картографическая основа представления материалов в основном томе доклада и Общем резюме соответствует положению на 1 сентября 2022 г.

**Рекомендуемое цитирование основного тома доклада:**
Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2022. – 676 с.

**Рекомендуемое цитирование отдельной главы или раздела основного тома доклада:**
[Список авторов], 2022: [Название главы или раздела] / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии. – С. [номер первой страницы – номер последней страницы главы или раздела].

ISBN 978-5-907618-13-8

© Росгидромет, 2022

# Содержание


**ВВЕДЕНИЕ** ..... 5

**1. ПРОИСХОДЯЩИЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА** ..... 13

**1.1 Глобальные изменения климата** ..... 14

1.1.1 Наблюдаемые изменения ..... 14

1.1.2 Сценарные прогнозы ..... 37

**1.2 Изменения климата на территории Российской Федерации** ..... 61

1.2.1 Наблюдаемые изменения ..... 61

1.2.2 Ожидаемые изменения ..... 110

**2. ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ, НАСЕЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ** ..... 137

**2.1 Природные системы** ..... 138

2.1.1 Природные системы суши ..... 138

2.1.2 Углеродный баланс почв ..... 182

2.1.3 Морские природные системы ..... 192

**2.2 Население** ..... 239

2.2.1 Демографическая ситуация и миграция ..... 239

2.2.2 Трудовые ресурсы и занятость ..... 258

*Климатические риски для здоровья населения* ..... 273

2.2.3 Погодные экстремумы и здоровье населения ..... 275

2.2.4 Эпидемическая обстановка ..... 293

**2.3 Секторы экономики, виды экономической деятельности и инфраструктура** ..... 308

2.3.1 Добывающая промышленность ..... 308

2.3.2 Сельское хозяйство ..... 320

2.3.3 Водное хозяйство ..... 344

2.3.4 Лесное хозяйство ..... 357

2.3.5 Энергетика ..... 368

2.3.6 Транспорт ..... 389

2.3.7 Строительство и жилищно-коммунальное хозяйство ..... 401

2.3.8 Инфраструктура в зоне многолетней мерзлоты ..... 417

2.3.9 Морская деятельность ..... 427

2.3.10 Туризм и рекреация ..... 444

**3. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ АДАПТАЦИИ К НИМ** ..... 457
**3.1 Федеральные округа** ..... 458
3.1.1 Центральный федеральный округ ..... 459
3.1.2 Северо-Западный федеральный округ ..... 472
3.1.3 Приволжский федеральный округ ..... 488
3.1.4 Южный федеральный округ ..... 501
3.1.5 Северо-Кавказский федеральный округ ..... 516
3.1.6 Уральский федеральный округ ..... 529
3.1.7 Сибирский федеральный округ ..... 544
3.1.8 Дальневосточный федеральный округ ..... 561
**3.2 Крупные города России** ..... 593
**3.3 Арктическая зона Российской Федерации** ..... 618

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** ..... 646

Приложение 1. Глоссарий ..... 653
Приложение 2. Список сокращений ..... 672

# ВВЕДЕНИЕ

# Введение

***В. М. Катцов***

Изменение климата на протяжении многих лет неизменно занимает высокие позиции в рейтингах глобальных угроз устойчивому развитию человечества. При этом у антропогенного изменения климата есть особенности, которые способны создавать иллюзию, что в отношении этой угрозы тяжелые решения могут быть отсрочены. Антропогенное изменение климата маскируется естественной изменчивостью климатической системы: эта сложная нелинейная система способна колебаться в большом диапазоне даже в отсутствие изменений во внешних воздействиях, причем – на разных пространственных и временных масштабах. Кроме того, инерция климатической системы, обусловленная прежде всего огромной теплоемкостью океана, существенно замедляет реакцию климата на изменения во внешних воздействиях, таких как выбросы парниковых газов, связанные с хозяйственной деятельностью человека. С другой стороны, значительная (порядка сотни лет) продолжительность пребывания в атмосфере однажды попавшего туда диоксида углерода, с неуклонным антропогенным ростом атмосферной концентрации которого связана бóльшая часть наблюдаемого и ожидаемого глобального потепления, не позволяет рассчитывать на быстрый отклик климатической системы на сокращение антропогенных выбросов парниковых газов.

Между тем современная наука, представленная в недавнем Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[1], уверенно констатирует (IPCC, 2021): (1) в атмосфере, океане, криосфере и биосфере произошли широкомасштабные и быстрые изменения; (2) масштабы недавних изменений в климатической системе в целом и нынешнее ее состояние во многих аспектах беспрецедентны на протяжении периодов от многих столетий до многих тысячелетий; (3) не вызывает сомнений, что разогрев атмосферы, океана и суши произошел под влиянием человека.

«Многоликость» и подчас кажущаяся парадоксальность глобального изменения климата мешают восприятию его как целостной проблемы. И только специалистам, занимающимся проблемой климата профессионально, видны как общая картина, так и закономерности, пробивающиеся через разнообразие погодно-климатических явлений и их пространственно-временных масштабов. Согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК (IPCC, 2021), антропогенное изменение климата уже влияет на многие экстремальные погодные и клима-

[1] Оценочные доклады МГЭИК – с первого по шестой – выходили в 1990, 1995, 2001, 2007, 2013–2014, 2021–2022 годах. Эти доклады, а также другие специальные доклады МГЭИК, равно как и описание процедуры их подготовки, можно найти на сайте https://www.ipcc.ch/. Оценочные доклады МГЭИК широко используются на международном и национальном уровнях для оценки степени влияния изменения климата на природные и хозяйственные системы, на население, а также для выработки стратегий реагирования, включая адаптацию и ограничение антропогенного воздействия на климатическую систему. Российские ученые участвуют в подготовке, рецензировании и принятии на Межправительственном уровне оценочных докладов МГЭИК. Оценочные доклады МГЭИК состоят из так называемых Вкладов трех рабочих групп МГЭИК, посвященных, соответственно, (1) фундаментальным аспектам проблемы изменения климата; (2) проблемам климатических воздействий, адаптации и уязвимости; а также (3) проблемам смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему. В данном случае речь идет об опубликованном в 2021 г. Вкладе Первой рабочей группы в Шестой оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2021). Ниже приводятся также некоторые выводы Вклада Второй оценочной группы МГЭИК, опубликованного в 2022 г. (IPCC, 2022).

тические явления во всех регионах земного шара. Доказательства наблюдаемых изменений для таких экстремальных явлений, как волны тепла, обильные осадки, засухи, тропические циклоны, а также их связи с человеческим фактором, со времени выхода Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) стали более убедительными.

Со все возрастающей уверенностью можно утверждать, что человечество ожидает усугубление наблюдаемых антропогенных изменений климата и соответствующих климатических воздействий: при всех рассмотренных МГЭИК сценариях выбросов глобальная приземная температура будет продолжать повышаться, по крайней мере, до середины века (IPCC, 2021). При этом такие изменения в климатической системе, как увеличение частоты и интенсивности экстремально высоких температур, волн тепла в океане и обильных осадков, сельскохозяйственных и экологических засух в некоторых регионах и доли интенсивных тропических циклонов, а также сокращение площади арктического морского льда, снежного покрова и многолетней мерзлоты, становятся более значительными и напрямую связаны с усилением глобального потепления. Ожидается, что продолжающееся глобальное потепление приведет к дальнейшей интенсификации глобального гидрологического цикла, включая его изменчивость, глобальные муссонные осадки и интенсивность влажных и засушливых явлений. При реализации сценариев с увеличением выбросов $CO_2$ поглотители углерода в океане и на суше будут менее эффективны с точки зрения замедления накопления $CO_2$ в атмосфере (IPCC, 2021).

Согласно МГЭИК (IPCC, 2022), антропогенное изменение климата, в том числе более частые и интенсивные экстремальные явления, вызвало широкомасштабные неблагоприятные воздействия и связанные с ними потери и ущерб для природы и людей, выходящие за рамки естественной изменчивости климата. Риски, связанные с изменениями климата, становятся все более сложными для управления. Ожидается возникновение многочисленных климатических и неклиматических рисков, взаимодействующих друг с другом, что приведет к усугублению общего риска и «каскадному» распространению рисков в секторах и регионах. При этом (с высокой степенью достоверности) некоторые меры реагирования на изменение климата могут привести к новым рискам.

В международном сообществе растет понимание и того, что, в частности, из-за вышеупомянутой инерционности глобальной климатической системы все большее значение приобретает адаптация человечества к происходящим и уже неизбежным в будущем изменениям климата. По этой причине первоначально доминировавшая в международном переговорном процессе тема смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему, сохраняя свою важность и актуальность, все больше места оставляет теме адаптации к изменениям климата. Это видно и в Парижском соглашении[1], достигнутом в 2015 году, которое Россия окончательно поддержала в 2019 году, и в Климатическом пакте Глазго[2], принятом на 26-й Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в 2021 году.

Отмечая прогресс в планировании и осуществлении адаптации во всех секторах и регио-

[1] http://cc.voeikovmgo.ru/images/sobytiya/2015/12/Paris_Agreement_l09r_RUS.pdf
[2] https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf

нах мира, МГЭИК (IPCC, 2022) констатирует, что прогресс этот распределяется неравномерно и с очевидными пробелами, и обращает внимание на инициативы, которые, отдавая приоритет немедленному и краткосрочному снижению климатических рисков, уменьшают тем самым возможность «трансформационной» адаптации. Кроме того, задокументированная для конкретных контекстов, секторов и регионов эффективность адаптации, согласно МГЭИК (IPCC, 2022), будет снижаться по мере усиления глобального потепления. МГЭИК связывает возможность повышения эффективности адаптации во многих секторах с «интегрированными, многосекторальными решениями, направленными на устранение социального неравенства, дифференцирование ответов на климатические риски и охват разных систем». С другой стороны, с усилением глобального потепления потери и ущерб будут увеличиваться, и большее число антропогенных и природных систем достигнет пределов адаптации (причем в некоторых экосистемах «жесткие» пределы адаптации уже достигнуты). Кроме того, МГЭИК указывает на появление все большего количества свидетельств «плохой адаптации» во многих секторах и регионах.

Россия, темпы потепления на территории которой с середины 1970-х годов к настоящему времени более чем в два с половиной раза превосходят среднеглобальные (Росгидромет, 2022), занимает особое место в контексте проблемы изменения климата – благодаря размерам своей территории, географическому положению, исключительному разнообразию климатических условий, структуре экономики, демографическим проблемам и геополитическим интересам.

Изменения климата затрагивают в той или иной степени интересы практически любой отрасли экономики, а также социальной сферы Российской Федерации. Планирование и осуществление многих крупных инвестиционных проектов в значительной мере чувствительны к вопросам учета климатического фактора и требуют усилий для того, чтобы реализуемые меры были экономически эффективны и одновременно способствовали снижению рисков и смягчению последствий изменяющегося климата, обеспечивая социальную и экологическую безопасность (Катцов, Порфирьев, 2017; Росгидромет, 2017). При этом важно иметь в виду, что помимо прямого воздействия на экономику и население Российской Федерации, погодно-климатический фактор оказывает существенное влияние на систему международных торгово-экономических и политических отношений.

В Докладе о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации в области компетенции Росгидромета (Росгидромет, 2020) отмечается, что наука является основным ресурсом адаптации к изменениям климата. Для надлежащей упреждающей адаптации к изменениям климата необходимы глубокие и хорошо технологически и кадрово оснащенные фундаментальные и прикладные исследования. Необходимы устойчиво функционирующая Государственная наблюдательная сеть и постоянный мониторинг климатических воздействий; реализованные на суперкомпьютерах непрерывно совершенствующиеся системы прогнозирования и регулярное уточнение полученных с их помощью прогнозов климатических изменений; мониторинг эффективности принятых мер адаптации и соответствующая корректировка адаптационных стратегий.

Росгидромет ведет регулярный мониторинг происходящих изменений климата и текущих климатических аномалий для земного шара, территории Российской Федерации и ее регионов. Результаты мониторинга представляются в ежегодном Докладе Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации (см. например, Росгидромет, 2022).

Важнейшим информационно-аналитическим продуктом Росгидромета, содержащим оценки наблюдаемых и возможных в будущем изменений климата и климатических воздействий на природные системы, население и отрасли экономики, являются Оценочные доклады Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Целью Оценочных докладов Росгидромета является разносторонний анализ научной информации, относящейся к проблеме изменений климата и их последствий на территории нашей страны – как в целом, так и в ее регионах, – а также к соответствующим направлениям адаптации.

Первый оценочный доклад Росгидромета (Росгидромет, 2008) фактически послужил научной основой для разработки проекта Климатической доктрины Российской Федерации (утверждена Президентом Российской Федерации 17 декабря 2009 г.)[1]. Второй оценочный доклад (Росгидромет, 2014) внес существенный вклад в информационно-аналитическое обоснование позиции Российской Федерации по Парижскому соглашению (2015 г.).

Подготовка Росгидрометом Третьего оценочного доклада этой серии была предусмотрена Национальным планом мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р[2]. Это обстоятельство определяет и ряд особенностей Третьего оценочного доклада, который – опираясь на выводы предыдущих оценочных докладов, сохраняющих свою актуальность, – ориентирован в значительной мере на информационно-аналитическое обеспечение (в области компетенции Росгидромета) адаптации в отраслях и регионах.

Источниками информации для Третьего оценочного доклада Росгидромета, как и для обоих предыдущих, послужили главным образом отечественные и зарубежные публикации в рецензируемых изданиях, монографии, сборники научных трудов. В докладе использованы данные мониторинга климата, осуществляемого на находящейся в ведении Росгидромета Государственной наблюдательной сети, а также результаты научных проектов, выполняемых в рамках профильных международных и российских программ исследований.

Третий оценочный доклада Росгидромета по структуре несколько отличается от предыдущих. Он состоит из трех частей: (1) Происходящие и ожидаемые изменения климата; (2) Воздействия изменений климата на природную среду, население и экономику; (3) Региональные последствия изменений климата и направления адаптации к ним.

Часть 1 посвящена рассмотрению происходящих и ожидаемых глобальных изменений климата, а также – изменений климата на всей территории России. Часть 2 рассматривает воздействия изменений климата на природ-

[1] http://kremlin.ru/events/president/news/6365
[2] http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf

ные системы, население и отрасли экономики на территории России в целом (а также на прилегающих акваториях Мирового океана). Часть 3 – и это новая особенность Третьего оценочного доклада – синтезирует оценки изменения климата и их секторальные последствия для федеральных округов Российской Федерации, тем самым создавая основу для дальнейшей (за пределами Третьего оценочного доклада) детализации и количественной оценки последствий изменений климата в субъектах Российской Федерации.

Настоящий доклад является совместным вкладом ученых, работающих в следующих научно-исследовательских институтах Росгидромета и Минобрнауки России, высших учебных заведениях и ряде других учреждений:

- Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета (головное учреждение по подготовке доклада), Санкт-Петербург;
- Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета, Санкт-Петербург;
- Всемирная метеорологическая организация, Женева;
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных Росгидромета, Обнинск;
- Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), Москва, а также его филиалы:
  - Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону;
  - Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), Калининград;
  - Волжско-Каспийский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ»), Астрахань;
  - Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н. М. Книповича), Мурманск;
  - Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток;
- Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии Росгидромета, Обнинск;
- Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик;
- Геофизический центр РАН, Москва;
- Государственный гидрологический институт Росгидромета, Санкт-Петербург;
- Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова Росгидромета, Москва;
- Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток;
- Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт Росгидромета, Владивосток;
- Институт водных проблем РАН, Москва;
- Институт географии РАН, Москва;
- Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля Росгидромета, Москва;
- Институт демографических исследований Федерального научно-исследовательского социологического центра РАН, Москва;
- Институт лесоведения РАН, Московская обл., с. Успенское;
- Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва;
- Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва;
- Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва;
- Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пущинский на-

учный центр биологических исследований РАН», Московская обл., Пущино;
- Институт экологии Российского университета дружбы народов, Москва;
- Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва;
- ООО «Энвайрон Консалт Си-Ай-Эс», Москва;
- Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург;
- Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва;
- Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Санкт-Петербург;
- Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток;
- Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В. В. Докучаева», Москва;
- Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва;
- Центральный научно-исследовательский институт эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва.

Настоящий доклад был подготовлен в рамках Плана научно-исследовательских и технологических работ (НИТР) Росгидромета на 2020-2022 гг. по направлению «Исследования климата, его изменений и их последствий. Оценка гидрометеорологического режима и климатических ресурсов», темы 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций». Кроме того, в докладе использованы результаты научных исследований, полученные в рамках других тем указанного Плана НИТР Росгидромета, научной тематики Минобрнауки России и других ведомств, а также грантов Российского научного фонда и других.

В рецензировании глав и разделов доклада приняли участие сотрудники научно-исследовательских учреждений Минобрнауки России, а также других учреждений.

Авторы доклада признательны Программе диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI), посредством Рабочей группы по объединенным моделям (WGCM) осуществившей координацию и продвижение Шестой фазы Проекта сравнения совместных моделей (CMIP6); участникам климатических модельных групп – за создание и предоставление результатов модельных расчетов; Международной организации научных порталов по земной системе (ESGF) – за архивацию и организацию доступа к данным и многочисленным организациям, оказывающим финансовую поддержку CMIP6 и ESGF.

Координация подготовки доклада осуществлялась Климатическим центром Росгидромета на базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

## Литература


**Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2017:** Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды ГГО, вып. 586, с. 7-20. http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2017/586.pdf

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Бедрицкий А. И. и др., ред.) – М.: Росгидромет, том 1, 230 с., и том 2, 291 с. http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-22-13-06-34;

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.) – М.: Росгидромет, 1009 с. http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52.

**Росгидромет, 2017:** Акентьева Е. М., Александров Е. И., Алексеев Г. В., Анисимов О. А., Балонишникова Ж. А., Булыгина О. Н., Георгиевский В. Ю., Докукин М. Д., Ефимов С. В., Иванов Н. Е., Калов Х. М., Катцов В. М., Киселев А. А., Клепиков А. В., Клюева М. В., Кобышева Н. В., Оганесян В. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Постнов А. А., Стадник В. В., Солдатенко С. А., Хлебникова Е. И., Шалыгин А. Л., Школьник И. М., 2017: Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. (Катцов В. М., ред.) – СПб.: Климатический центр Росгидромета, ООО «Амирит», 106 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf

**Росгидромет, 2020:** Хлебникова Е. И., Акентьева Е. М., Гаврилова С. Ю., Ефимов С. В., Ивахов В. М., Караченкова А. А., Катцов В. М., Киселев А. А., Клюева М. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Порфирьев Б. Н., Ревич Б. А., Рудакова Ю. Л., Стадник В. В., Стерин А. М., Чичерин С. С., Школьник И. М., 2020: Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). (Катцов В. М. и Порфирьев Б. Н., ред.) – СПб.: Климатический центр Росгидромета, ООО «Амирит». 120 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf

**Росгидромет, 2022:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва, Росгидромет, 110 с., http://cc.voeikovmgo.ru/images/sobytiya/2022/03/doklad_klimat2021.pdf

**IPCC, 2013:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

**IPCC, 2021:** Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

**IPCC, 2022:** Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

# 1.

# ПРОИСХОДЯЩИЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

# 1.1 Глобальные изменения климата

## 1.1.1 Наблюдаемые изменения

*А. А. Киселев*

### Глобальная система наблюдений за климатом

Созданная в 1992 г. глобальная система наблюдений за климатом (ГСНК, Global Climate Observing System (GCOS)) предназначена для обеспечения данными наблюдений и информацией, необходимыми для решения связанных с климатом проблем, всех потенциальных пользователей. Основными системами наблюдений, вносящими вклад в ГСНК, являются Интегрированная глобальная система наблюдений Всемирной метеорологической организации (ВМО) (WMO Integrated Global Observing System (WIGOS)), Глобальная служба криосферы (Global Cryosphere Watch (GCW)) и Система наблюдений за мировым гидрологическим циклом (World Hydrological Cycle Observing System (WHYCOS)), а также Глобальная система наблюдений за океаном (Global Ocean Observing System (GOOS)).

В настоящее время мониторинг осуществляют более 10 000 наземных метеорологических станций, 1000 аэрологических станций, 7000 судов, 100 пришвартованных и 1000 дрейфующих буев, сотни метеорологических радаров и 3000 специально оборудованных коммерческих самолетов, ежедневно измеряющих ключевые параметры атмосферы, поверхности суши и океана. Кроме того, информацию регулярно дополняют около 30 метеорологических и 200 исследовательских спутников. Особое значение уделяется наземным станциям, наблюдения на которых ведутся 100 и более лет: в мае 2017 г. ВМО был определен первый набор таких станций, список которых должен обновляться каждые два года[1].

В рамках ГСНК учреждены три группы экспертов для определения наблюдений, необходимых в каждой из основных глобальных областей – атмосферы (Atmospheric Observation Panel for Climate (AOPC)), океанов (Ocean Observations Panel for Climate (OOPC)) и суши (Terrestrial Observation Panel for Climate (TOPC)), – с целью подготовки конкретных элементов программы и выработки рекомендаций для ее реализации. Группы экспертов ГСНК определяют набор основных климатических переменных (Essential Climate Variables, ECVs), необходимых для систематического наблюдения за изменением климата Земли.

ГСНК определила список, состоящий из 50 основных климатических переменных, подлежащих постоянному наблюдению, как необходимых для создания и обновления глобальной климатической продукции и производной информации. Он включает следующие компоненты[2]:

- Атмосфера: молниевые разряды, облака, радиационный баланс Земли, скорость и направление ветра, температура, водяной пар, компоненты атмосферного воздуха: углекислый газ $CO_2$, метан $CH_4$ и другие парниковые газы, озон $O_3$, аэрозоли, предшественники (precursors) озона и аэрозолей;
- Приземный слой: осадки, атмосферное давление, радиационный баланс, скорость и направление ветра, температура, водяной пар;
- Поверхностный слой океана: температура, состояние моря (sea state), морское волнение (sea stress), морской лед, поток тепла с по-

[1] https://community.wmo.int/activity-areas/global-observing-system-gos
[2] https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables

верхности, соленость, поверхностные течения, уровень моря;
- Биогеохимия: неорганический углерод, кислород, питательные вещества, короткоживущие трассеры (transient tracers), закись азота $N_2O$, цвет воды (ocean colour);
- Подповерхностный слой океана: температура, течения, соленость;
- Биология океана/экосистемы: обитатели, планктон;
- Криосфера: ледниковые щиты и шельфовые ледники, ледники, снег, многолетняя мерзлота;
- Антропосфера: водопользование, эмиссия парниковых газов;
- Биосфера: надземная биомасса, растительный покров, альбедо, пожары, температура поверхности, индекс площади листа (LAI), доля поглощенной фотосинтетически активной радиации, углерод почвы;
- Гидросфера: речной сток, озера, грунтовые воды, влажность почвы, испарение с поверхности.

Семь из них являются ключевыми (рис. 1.1.1.1).

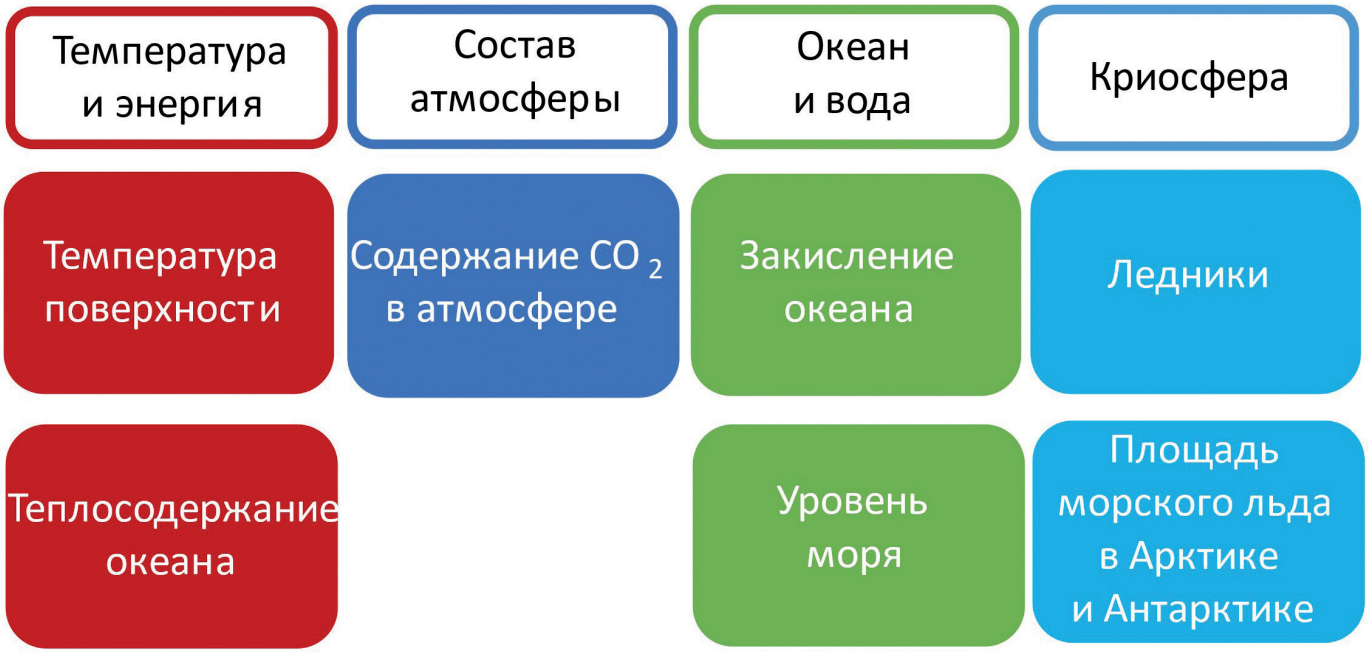



***Рис. 1.1.1.1*** *Ключевые климатические переменные*[1]

ГСНК создан ряд сетей (рис. 1.1.1.2), таких как наземная сеть ГСНК (GCOS Surface Network (GSN)), аэрологическая сеть ГСНК (GCOS Upper-Air Network (GUAN)), GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN), Baseline Surface Radiation Network (BSRN, проект World Climate Research Programme (WCRP) и the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)) и др. Эти сети составляют основу Региональной базовой климатологической сети (Regional Basic Climatological Network (RBCN)), обеспечивающей детальную пространственную информацию об изменчивости климата. Установлена иерархия сетей и систем наблюдений, включающая комплексные, базовые и эталонные сети, основанные на предположениях о потребностях пространственной выборки.

[1] https://gcos.wmo.int/

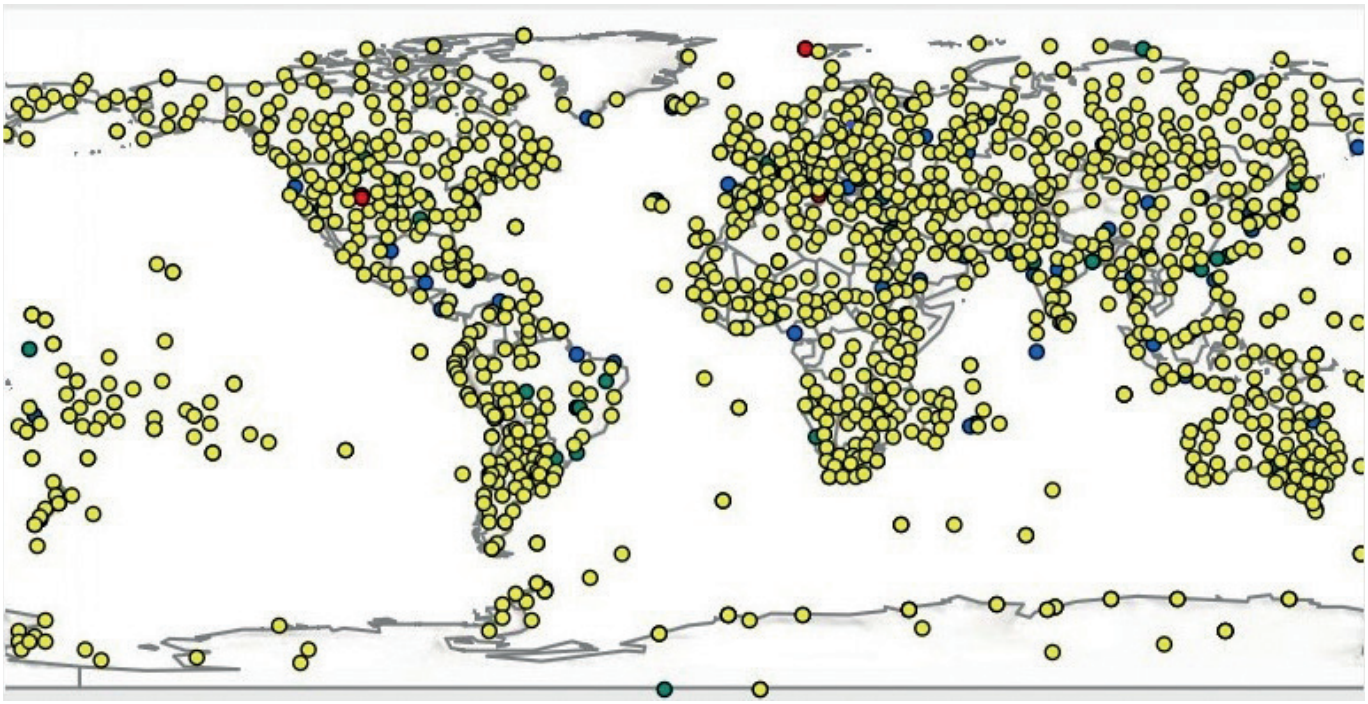


***Рис. 1.1.1.2*** *Сеть наземных станций ГСНК[1]: GSN (желтые); GRUAN (красные); BSRN (зеленые); GUAN (голубые)*

**Реанализы**

Реанализы представляют собой результаты модельных расчетов (ретроспективных прогнозов) атмосферных или океанских полей, произведенных с использованием всего комплекса имеющихся данных наблюдений. Там, где такие данные отсутствуют, они дополняются соответствующими модельными результатами. Основная цель создания реанализа заключается в последующем его использовании в качестве входных параметров климатических моделей, а также для оценки их качества.

В последние десятилетия в мире создан ряд постоянно пополняемых и совершенствуемых архивов данных и реанализов, в том числе:

- NOAAGlobalTemp (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США, NOAA) – набор данных о глобальной температуре поверхности суши и океана на пространственной сетке 5° × 5° (87,5° ю.ш. – 87,5° с.ш., 2,5° в.д. – 357,5° в.д.) с месячным разрешением с января 1880 года по настоящее время. Набор данных о глобальной температуре водной поверхности построен на базе четвертой версии ERSST (Extended reconstructed sea surface temperature), а суши – на базе данных Global Historical Climatology Network Monthly (GHCN-M), версия 3.3.0. Данные NOAAGlobalTemp представлены в виде аномалий температуры средних месячных значений за 1971-2000 гг. в соответствии с соглашением Всемирной метеорологической организации (NOAAGlobalTemp, 2015).
- GISTEMP v4 (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, NASA) – набор данных о глобальном изменении температуры по-

[1] https://gcos.wmo.int/en/networks/atmospheric

верхности на пространственной сетке 2° × 2° с месячным разрешением с января 1880 года по настоящее время. Также использует данные NOAA, четвертую версию GHCN и пятую версию ERSST (GISTEMP v4, 2019).

- HadCRUT4 и CRUTEM4 (Центр Хэдли Метеорологического бюро Великобритании и Отдел климатических исследований Университета Восточной Англии и Метеорологическое бюро Великобритании) – набор данных о глобальной температуре поверхности суши и океана на пространственной сетке 5° × 5° с месячным разрешением с января 1850 года по настоящее время построен на данных примерно 5500 станций. Отличается от вышеприведенных продуктов NASA и NOAA тем, что в нем не используется интерполяция, и, как следствие, имеет многочисленные пропуски (HadCRUT4, 2012).
- CRU TS (Отдел климатических исследований Университета Восточной Англии и Метеорологическое бюро Великобритании) – широко используемый набор климатических данных (средняя, минимальная и максимальная температура; количество осадков; давление водяного пара, число дней с дождем; облачность) на сетке 0,5° × 0,5° по территории суши, кроме Антарктиды. Получен путем интерполяции месячных аномалий по данным наблюдений метеостанций. Версия CRU TS v4 обновлена за период 1901-2018 гг. за счет включения дополнительных наблюдений станций и продолжает обновляться ежегодно (CRU-4, 2020).
- MERRA-2 (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, NASA) – глобальный реанализ атмосферы, охватывающий эпоху спутниковых наблюдений с 1980 года по настоящее время. Он предоставляет упорядоченные записи параметров глобальной атмосферы с регулярной привязкой и включает дополнительную информацию о климатической системе: газовые следы (стратосферный озон), улучшенное представление поверхности Земли и криосферные процессы. MERRA-2 – первый глобальный реанализ спутниковой эры, ассимилирующий космические наблюдения за аэрозолями и представляющий их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе (MERRA-2, 2017).
- ERA5 (Европейский центр прогнозов погоды) предоставляет ежечасные оценки большого набора климатических переменных для атмосферы, суши и океана. Данные покрывают Землю на сетке 30 км и с разрешением в атмосфере 137 уровней от поверхности до высоты 80 км. Ежемесячные обновления ERA5 гарантированного качества публикуются в течение трех месяцев в режиме реального времени. Предварительные ежедневно обновляемые наборы данных доступны пользователям в режиме реального времени в течение пяти дней. ERA5 объединяет обширный массив исторических наблюдений в глобальные оценки с использованием передовых систем моделирования и усвоения данных (ERA-5, 2020).
- JRA-55 (Японское метеорологическое агентство) – реанализ, охватывающий период с 1958 г., когда начались регулярные аэрологические (радиозондовые) наблюдения в глобальном масштабе. Разрешение составляет около 55 км по пространству, три часа по времени. Предоставляются данные о температуре, коротковолновой и длинноволновой радиации, осадках (жидких и твердых), ветре и др. (JRA-55, 2015).
- NCEP/NCAR (совместный продукт Национального центра экологического прогнозирования и Национального центра атмосферных исследований США) – реанализ, использующий данные широкого набора метеорологических параметров (температура, альбедо, атмосферное

давление, облачность, осадки, длинноволновая и коротковолновая радиация, протяженность морского льда и пр.) с 1948 года по настоящее время на глобальной сетке 2,5° × 2,5° (144 × 73 узлов) от 0,0° до 357,5° в.д., от 90,0° с.ш. до 90,0° ю.ш. и на 17 уровнях по вертикали. Доступны ежедневно обновляемые данные в исходном формате четыре раза в день и в виде средних значений за день (NCEP/NCAR, 1996).

- DEL (Делавэрский Университет, США) – глобальный набор данных (температура воздуха, осадки и водный баланс над сушей) на глобальной сетке 0,5° × 0,5° (720 × 360 узлов) от 89,75° с.ш. до 89,75° ю.ш., от 0,25° в.д. до 359,75° в.д., включающий ежемесячные глобальные данные наземных станций высокого разрешения с привязкой к сетке в период 1900-2017 гг. (DEL, 2001).

**Парниковые газы**

Вслед за Пятым оценочным докладом Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК (IPCC, 2013), в котором отмечалось, что влияние человека на климатическую систему постепенно усиливается, в Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021) сделан вывод о том, что это влияние очевидно, о чем свидетельствуют повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, положительное радиационное воздействие, наблюдаемое потепление и лучшее понимание процессов, происходящих в климатической системе. Продолжающийся рост содержания парниковых газов в атмосфере стал (с разной степенью достоверности)[1] причиной изменения режимов осадков и солености вод Мирового океана, а также повышения кислотности океанических вод и сокращения площади и толщины арктического морского льда в последние десятилетия и др. (IPCC, 2021).

Среди вносящих заметный вклад в усиление парникового эффекта атмосферных газов водяной пар $H_2O$, углекислый газ $CO_2$, метан $CH_4$, закись азота $N_2O$, озон $O_3$, большая группа хлор- и бромсодержащих химикатов (основные – CFC-11 ($CFCl_3$) и CFC-12 ($CF_2Cl_2$)). Содержание в атмосфере всех перечисленных, за исключением водяного пара, газов в большей или меньшей степени зависит от хозяйственной деятельности человека, поэтому их обычно называют антропогенными парниковыми газами.

Вклад каждого газа в парниковый эффект оценивается двумя характеристиками – потенциалом глобального потепления (Global Warming Potential) и радиационным форсингом (Radiative Forcing). Первая описывает, насколько единица массы данного газа эффективнее разогревает атмосферу, чем единица массы эталонного газа – $CO_2$. Вторая – общий вклад каждого парникового газа в среднегодовой дисбаланс между приходящим от Солнца и уходящим от Земли излучением в современных условиях по сравнению с доиндустриальным уровнем (1750 г.). Согласно современным оценкам, около 80% прямого радиационного форсинга приходится на $CO_2$ (~60%), и $CH_4$ (~20%), а еще 16% – на три других парниковых газа: $N_2O$, CFC-11 и CFC-12[2]. Все эти газы (кроме метана) являются долгоживущими: время жизни в атмосфере $CO_2$, $N_2O$ и CFC-12 составляет 100 и более лет, CFC-11 – 45 лет. Метан, отнесенный к категории короткоживущих газов, существует в атмосфере примерно девять лет[3].

Атмосферные концентрации трех парниковых газов, имеющих как естественные, так и антро-

[1] Приводимые в главе 1.1.1 оценки достоверности результатов соответствуют системе, принятой МГЭИК (Mastrandrea et al., 2011).
[2] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf
[3] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

погенные источники, значительно выросли, начиная с доиндустриальной эпохи: $CO_2$ – на 46, $CH_4$ – на 157, и $N_2O$ – на 22%[1]. При этом если содержание в атмосфере $CO_2$[2] и $N_2O$ в последние десятилетия росло монотонно, то концентрация метана в 2000-2007 гг. почти не изменялась (увеличилась на 0,6% за восемь лет) и лишь затем возобновила свой рост (рис. 1.1.1.3). О причинах этого явления единого мнения не существует, см., например, (Nisbet et al., 2016). Содержание фреонов первого поколения, CFC-11 и -12, имеющих полностью антропогенное происхождение, начало снижаться в XXI веке в результате действия ограничений Монреальского протокола и его дополнений. Однако одновременно продолжали расти концентрации их заменителей, в том числе HCFC-22 ($CHClF_2$) и HFC-134a ($CH_2FCF_3$) (рис. 1.1.1.3), время жизни которых 11,9 и 13,4 года соответственно[3]. Ограничения на производство и использование этих химикатов были введены только в 2010-е гг. и пока затронули главным образом лишь наиболее развитые экономические страны (США, ЕС, Японию, Австралию). Несмотря на то что потенциал глобального потепления HCFC-22 и HFC-134a на три порядка выше, чем у $CO_2$, их современный вклад в усиление парникового эффекта невелик, поскольку их атмосферные концентрации на шесть порядков ниже, чем у $CO_2$.

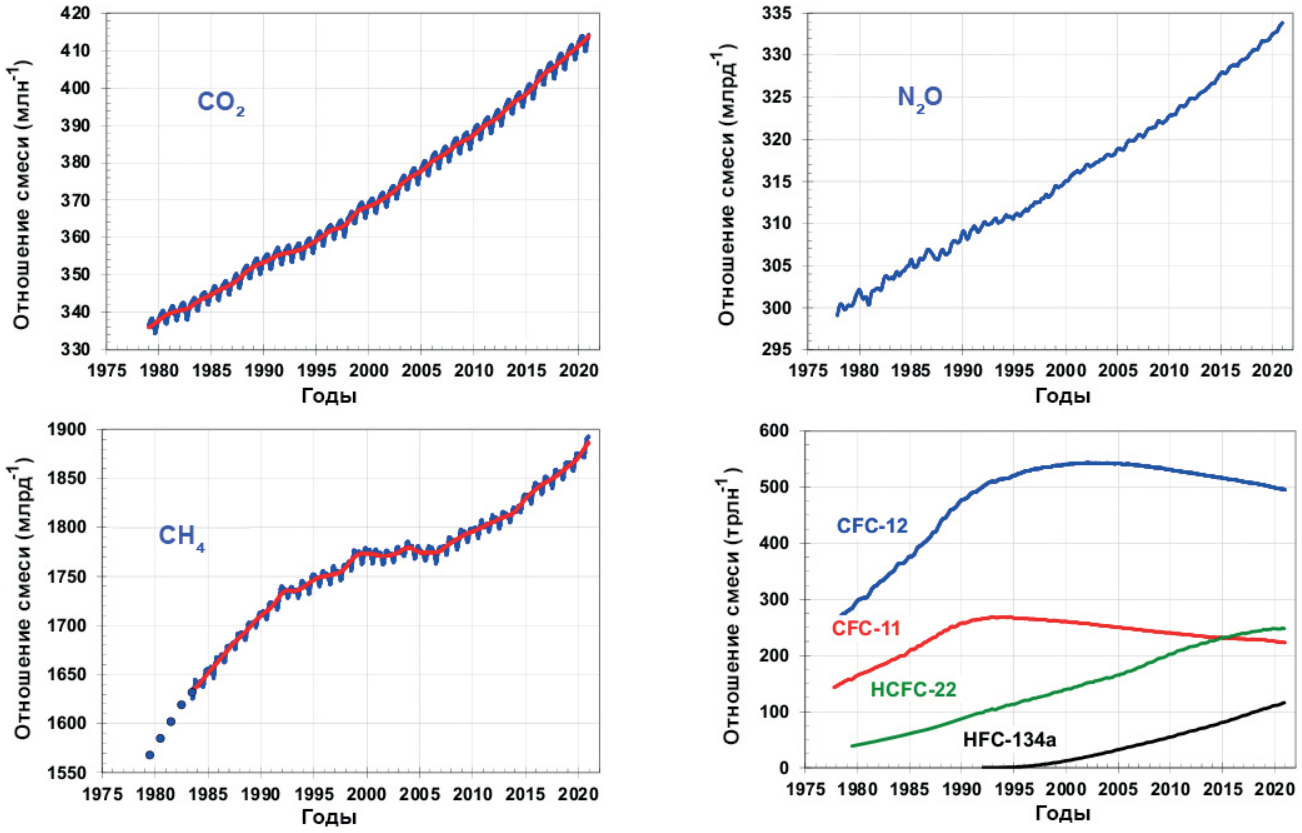



***Рис. 1.1.1.3*** *Среднее глобальное содержание основных хорошо перемешанных долгоживущих парниковых газов – двуокиси углерода, метана, закиси азота, CFC-12, CFC-11, HCFC-22 и HFC-134a – по данным глобальной сети отбора проб воздуха NOAA в 1979-2021 гг.*[4]

[1] https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-levels-atmosphere-reach-new-record

[2] Годовые темпы роста $CO_2$ существенно различались, достигая пика во время сильных явлений Эль-Ниньо, как это было в 2015–2016 гг. (Betts et al., 2016).

[3] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

[4] https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html

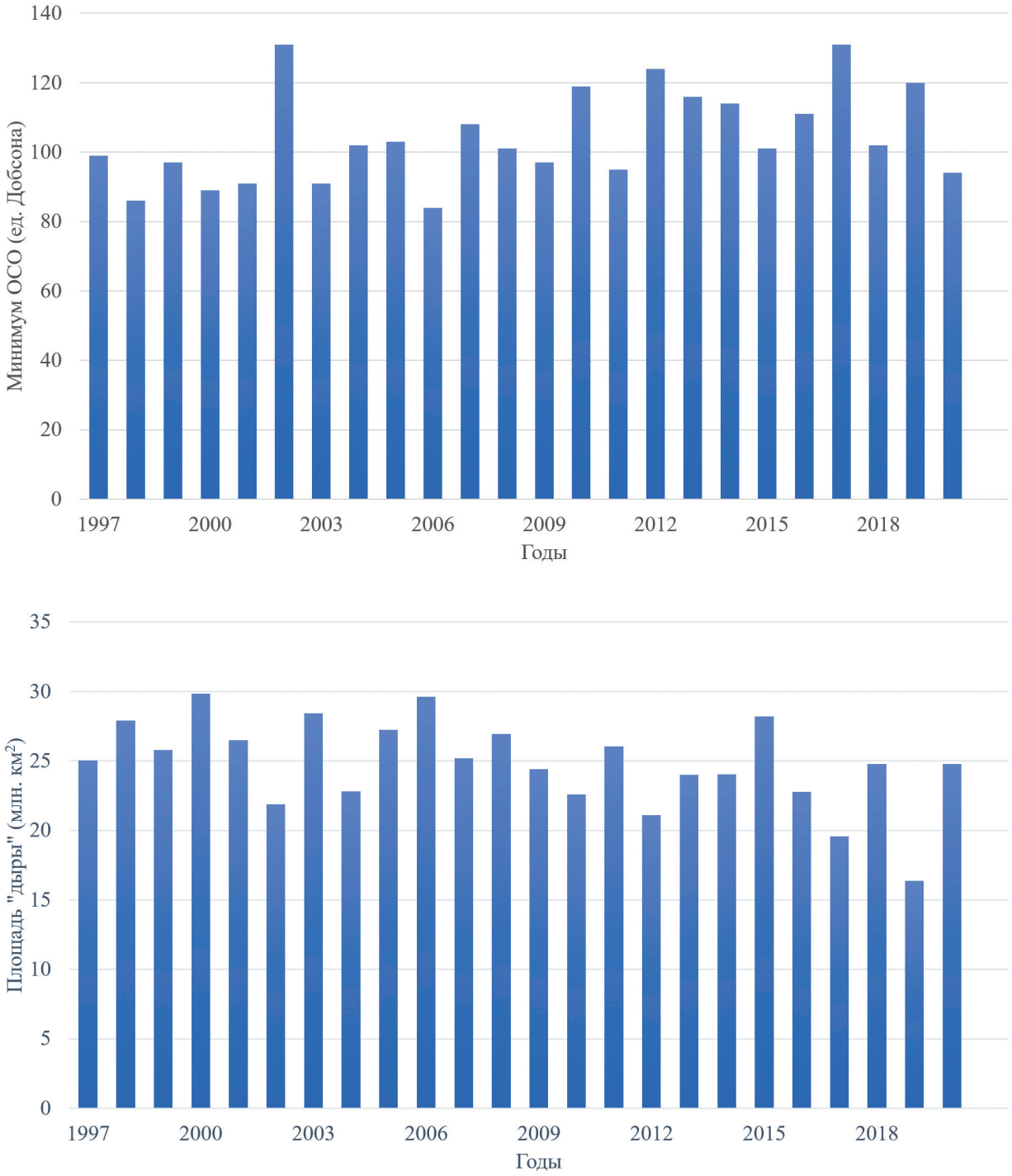



***Рис. 1.1.1.4*** *Минимальные значения ОСО, ед. Добсона, в антарктической озоновой «дыре» (сверху) и ее площадь, млн км² (внизу) в период 1997-2020 гг. по данным NASA*[1]

Особая роль озона заключается в том, что он одновременно является и парниковым газом, и фильтром для жесткой ультрафиолетовой солнечной радиации, губительной для живых организмов. Географическое распределение Общего Содержания Озона (ОСО, суммарного числа молекул озона в атмосферном столбе с площадью основания 1 см²) очень неоднородно, вне тропиков ОСО имеет значительный сезонный ход, наиболее выраженный

[1] https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/

в полярных областях. С момента обнаружения весенней озоновой «дыры» над Антарктидой в середине 1980-х гг. там налажен регулярный мониторинг озоносферы. Меры по защите озонового слоя Земли (Монреальский протокол и его дополнения) пока не дали ощутимых результатов: наметившееся в последнее пятилетие уменьшение глубины и площади «дыры» было нарушено весной 2020 г. (рис. 1.1.1.4). Озоновый слой находится на пути восстановления, и возвращение содержания озона над Антарктикой к уровням до 1980 г. следует ожидать к 2060 г. (WMO, 2018). Появление озоновой «дыры» над Арктикой происходит нерегулярно: наибольшее истощение озонового слоя здесь наблюдалось в 1997, 2011 и 2020 гг., причем в последнем случае площадь «дыры» впервые достигала 19 млн км$^2$, самые низкие значения ОСО над Арктикой наблюдались в марте и составляли порядка 200 единиц Добсона (е.Д.). Для сравнения: в Антарктиде отсчет «дыры» начинается, когда ОСО не превосходит 220 е.Д.

**Температура приземного воздуха**

По данным ВМО, 2015-2020 гг. были самым теплым шестилетием, а 2011-2020 гг. – самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений. Начиная с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее, чем любое предыдущее после 1850 года (WMO, 2021). Современная средняя глобальная температура составила примерно 14,9 °C, что на 1,2 °C выше, чем в доиндустриальную эпоху, см. рис. 1.1.1.5 (WMO, 2021).

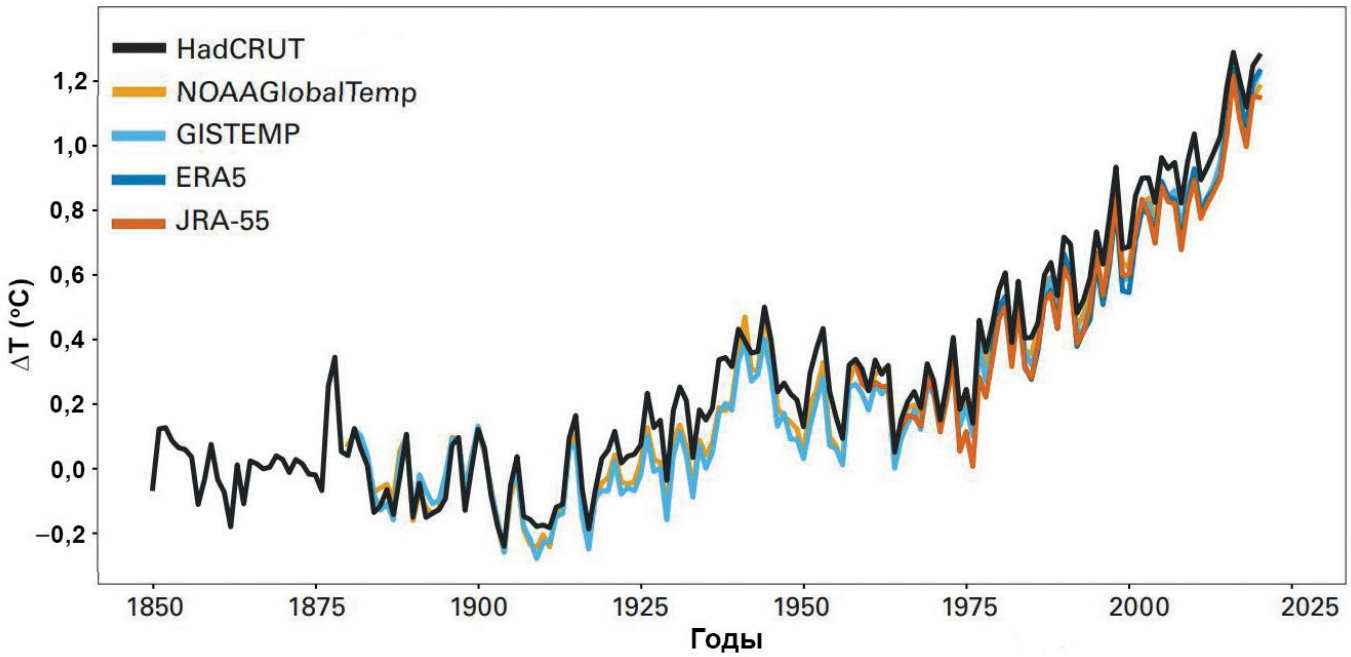



***Рис. 1.1.1.5*** *Отклонение среднеглобальной температуры приземного воздуха (°C) от среднеглобальной в доиндустриальный период (1850-1900 гг.) по данным пяти архивов: HadCRUT (Великобритания), NOAAGlobalTemp (NOAA, США), GISTEMP (NASA, США), ERA5 (ECMWF, Европейский Союз), JRA-55 (Япония) (WMO, 2021)*

*Разброс между пятью комплектами данных в 2021 году равен 0,15 °C, при этом самое низкое (1,05 °C) и самое высокое (1,20 °C) значения превысили на 1 °C показатели доиндустриального базового периода*

Средние темпы потепления приземного воздуха в течение 1976-2020 гг., по данным HadCRUT4, составили 0,18 °С/10 лет в глобальном масштабе, 0,28 °С/10 лет – над сушей[1], причем только за этот период глобальная температура выросла на 0,8 °С (Росгидромет, 2021). Значительно интенсивнее в те же годы повышалась температура в средних и высоких широтах Северного полушария: так, в среднем по территории России ее рост достигал (в 2020 г.) 0,51 °С/10 лет[2]. Наиболее быстрыми темпами росла температура Северной полярной области в последние тридцать лет (1991-2020 гг.): рост среднегодовой температуры достиг здесь 0,88 °С/10 лет, т.е. 2,64 °С за 30 лет (Росгидромет, 2021).

Данные наблюдений (за 50 и более лет) на глобальной сети, состоящей из 3288 станций, свидетельствуют о том, что потепление в Северном и Южном полушариях существенно различается (рис. 1.1.1.6 и табл. 1.1.1.1).

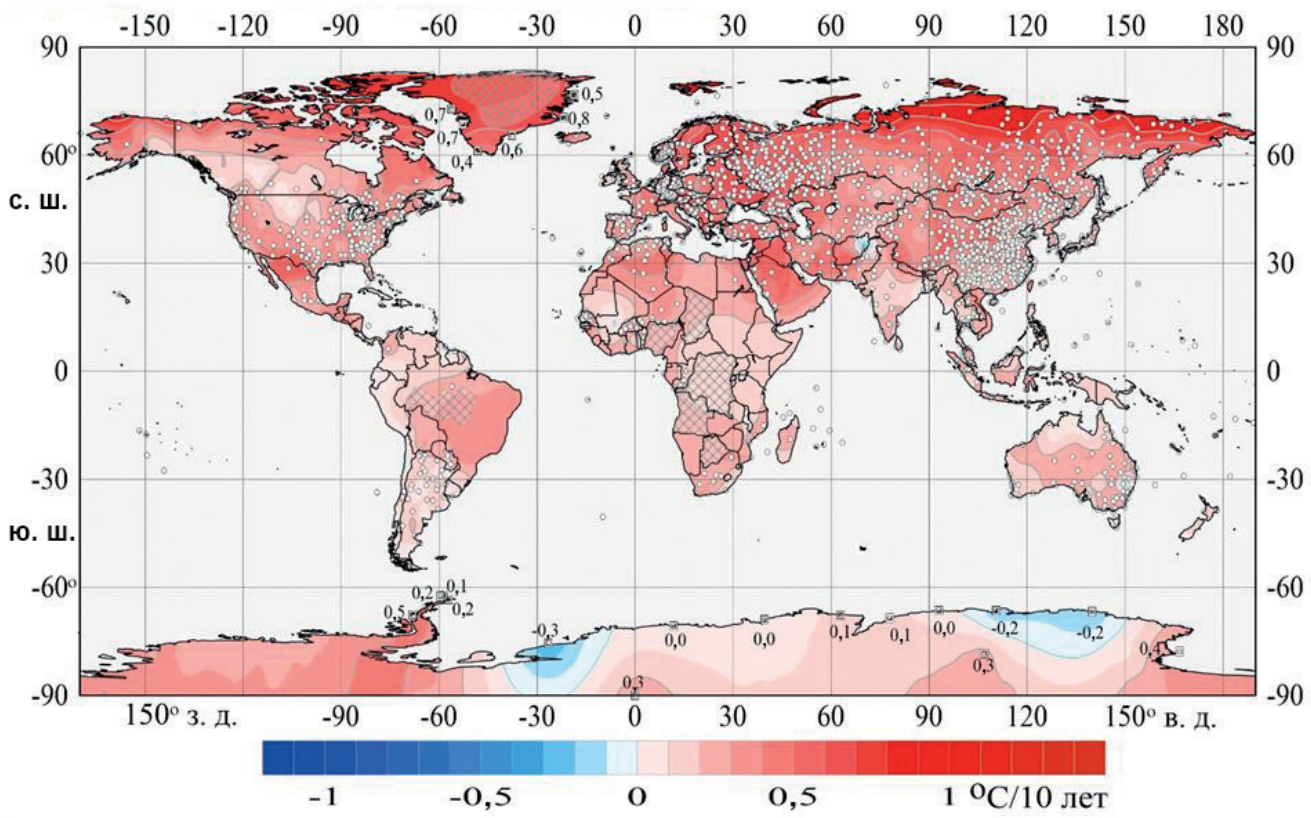



***Рис. 1.1.1.6*** *Пространственное распределение локальных коэффициентов линейного тренда (1976-2020 гг.) по данным 3288 наземных станций*

*Области, не представленные в этом архиве, показаны штриховкой. Для станций Антарктиды и Гренландии приведены значения коэффициентов тренда. Белыми кружками отмечены станции, для которых тренд статистически значим на уровне 1% (Бардин и др., 2020)*

[1] Согласно недавним оценкам, рост температуры – глобальной и над сушей – за период 1979–2019 гг. оказался немного выше: 0,195 и 0,296 °С/10 лет соответственно (Li et al., 2021).

[2] По данным Росгидромета, в 2021 г. значение этого тренда понизилось до 0,49 °С/10 лет

***Таблица 1.1.1.1*** *Коэффициенты линейного тренда (1976-2020 гг., °С/10 лет) пространственно осредненных аномалий приземной температуры для земного шара, полушарий и континентов по данным 3288 наземных станций. Все коэффициенты значимы на уровне 1% (Бардин и др., 2020)*

| Земной шар | | Северное полушарие | | Южное полушарие | |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,30 | | 0,35 | | 0,17 | |
| Азия | Европа | Северная Америка | Южная Америка | Африка | Австралия |
| 0,38 | 0,51 | 0,29 | 0,18 | 0,29 | 0,21 |

Для 98% станций, представленных в архиве и для которых был возможен расчет, тренды положительны (практически на всей территории земного шара), из них 80% значимы на уровне 1%, еще 8% – на уровне 5%. Таким образом, около 90% всех трендов свидетельствуют о существовании глобального потепления. В Европе и Африке положительные тренды составляют 100%, в Азии – 99%.

Отрицательные тенденции с уровнем значимости 5% отмечены лишь на семи станциях, среди них на двух (Вашингтон –0,32 °С/10 лет и Дюмон-д'Эрвиль, Антарктида –0,2 °С/10 лет) уровень значимости 1% (Бардин и др., 2020).

Сезонная изменчивость наиболее ярко выражена на континентах Северного полушария.

Антарктические тренды обладают заметной неоднородностью: существенны различия в значениях трендов в западной и восточной частях материка, прибрежной и внутриматериковой зонах. В частности, за последние 30 лет на Южном полюсе наблюдалось рекордно высокое статистически значимое потепление 0,61 ± 0,34 °С за десятилетие, что более, чем в три раза, превышает среднемировой показатель (Clem et al., 2020).

**Осадки**

Оценки тенденций изменения количества осадков в глобальном масштабе в значительной степени разноречивы и обладают большими неопределенностями. Это связано как с самой природой явления, так и с современными возможностями глобального мониторинга, даже в условиях внедрения спутниковых систем наблюдения. При создании архивов данных по осадкам используются либо только спутниковые данные, либо совокупность наземных и спутниковых данных с привлечением методов реанализа. При этом, вследствие неоднородностей данных об осадках, возникают систематические и случайные ошибки измерений, а также ошибки, обусловленные алгоритмами усвоения данных в реанализах. Несмотря на то что пространственный охват архивов близок к глобальному, точность оценок ухудшается по мере приближения к высоким широтам.

Вероятно, что влияние человека способствовало наблюдаемым крупномасштабным изменениям количества осадков с середины XX века (IPCC, 2021). Тенденции последних десятилетий говорят об увеличении количества глобальных осадков над сушей, причем темпы его прироста увеличиваются. Этот прирост в разных наборах данных оценивается в 5-10 мм/год за десятилетие при наличии больших межгодовой изменчивости и региональной неоднородности. В частности, по данным CRU TS v4 (набора климатических данных на горизонтальной сетке 0,5° × 0,5° для всех областей суши, кроме Антарктиды), такой прирост составляет 9,30±7,22 мм/год за десятилетие, при значимости тренда 10% (Harris et al., 2020). Увеличение количества осадков зафиксировано над тропической Африкой, Центральной Азией, восточными частями Европы и Северной Америки, а снижение – в Северной Африке и на Ближнем Востоке, центральной части Южной Америки, на западе Северной Америки; наиболее значителен рост осадков на большей части Африки, а наибольшее сокращение – на юге Южной Америки (Knutson, Zeng, 2018).

Над океанами существующие наборы данных об осадках расходятся по знаку и величине трендов.

Значительные неопределенности присутствуют в пространственных оценках разности между количеством осадков и испарением (P–E): по данным наблюдений, она положительна над сушей и отрицательна над океанами.

**Общая циркуляция атмосферы**

Исследования изменения общей циркуляции атмосферы ведутся в условиях отсутствия длинных рядов данных, как правило, с привлечением реанализов. Такой подход неизбежно порождает значительные погрешности и не позволяет делать окончательные выводы с достаточной степенью уверенности. В результате можно перечислить лишь наметившиеся в последние годы тенденции в изменениях крупномасштабных атмосферных движений.

Анализ данных за последние четыре десятилетия показывает расширение тропических ячеек циркуляции Хэдли (Hadley) и Уокера (Walker) со смещением к полюсам в среднем на несколько десятых градуса широты за десятилетие (Grise et al., 2018; Grise, Davis, 2020). При этом спутниковые наблюдения в верхних слоях тропосферы предполагают значительно меньшее усиление циркуляции Уокера, чем реанализы.

Скорость субтропических струйных течений увеличивалась зимой и снижалась летом в обоих полушариях, но эта тенденция существенно зависит от региона (Manney, Hegglin, 2018; Lee et al., 2019). Общее число внетропических циклонов, вероятно, увеличилось с 1980-х годов в Северном полушарии, однако число сильных циклонов сократилось. В Южном полушарии, напротив, число сильных внетропических циклонов, вероятно, возросло.

Атмосферный блокинг – устойчивое, полустационарное погодное условие, характеризующееся аномалией высокого давления, прерывающей западный поток воздуха в средних широтах обоих полушарий. В результате блокинга часто возникают экстремальные явления, такие как обильные осадки, засуха, волны тепла или холода. Сегодня нет единого мнения относительно наблюдаемых тен-

денций в блокировании, однако отмечается значительное увеличение частоты блокингов в Арктике и в летнее время над Гренландией (IPCC, 2021).

Глобальное ослабление приземного ветра, вероятно, произошло над сушей, особенно заметное в Северном полушарии (Azorin-Molina et al., 2019).

Северный стратосферный полярный вихрь в течение последних десятилетий менялся в зависимости от сезона и высоты. Высота геопотенциала нижней стратосферы в середине зимы над полярным регионом к северу от 70° с.ш. значительно увеличилась с начала 1980-х гг. (Garfinkel et al., 2017). Этот сигнал распространяется на среднюю и верхнюю стратосферу.

**Криосфера суши**

Элементами криосферы суши являются твердые осадки, снег, озерный и речной лед, ледники и ледяные шапки, ледниковые щиты, многолетняя мерзлота и сезонномерзлые грунты. Наблюдения показывают общее уменьшение снежного покрова, массы ледников и многолетней мерзлоты вследствие изменения климата в последние десятилетия. Продолжительность залегания снежного покрова в горных районах сократилась почти повсюду и особенно на низких высотах – в среднем на 5 дней за десятилетие с вероятным диапазоном от 0 до 10 дней за десятилетие (IPCC, 2019). Высота и площадь снежного покрова на малых высотах колеблются от года к году, но в среднем снизились.

Число и площадь ледниковых озер за последние десятилетия возросли в большинстве регионов. Весьма вероятно, что влияние человека способствовало наблюдаемому сокращению весеннего снежного покрова в Северном полушарии с 1950 года (IPCC, 2021).

В некоторых регионах число лавин при выпадении мокрого снега увеличилось, а число паводков из-за дождя уменьшилось на низких высотах весной и увеличилось на больших высотах зимой. Отчасти из-за раннего таяния снегов на западе США увеличились число и масштабы лесных пожаров (IPCC, 2019).

Динамика снежного покрова и ледников изменила объем и сезонность стока в речных бассейнах с преобладанием снега и ледникового питания с локальным воздействием на водные ресурсы и сельское хозяйство. Зимний сток увеличился в последние десятилетия из-за большего количества осадков, выпадающих в виде дождя. В некоторых реках, питаемых ледниками, летний и годовой сток увеличился из-за более интенсивного таяния ледников, но уменьшился там, где объем талой воды сократился из-за сокращения площади ледников. Это наблюдалось преимущественно в регионах с преобладанием небольших ледников, таких как Европейские Альпы.

Большинство изменений снежного покрова на более низких высотах обусловлено увеличением количества жидких осадков и ускорением таяния снега на всех высотах, происходящим в основном из-за изменений атмосферных процессов, особенно повышения температуры воздуха (Marty et al., 2017), которые, в свою очередь, связаны с более крупномасштабными антропогенными воздействиями.

Оценка последствий осаждения на снежный покров светопоглощающих частиц аэрозоля, таких как сажа, органический углерод и минеральная пыль, является новой проблемой

(Skiles et al., 2018). Имеются отдельные доказательства того, что увеличение осаждения черного углерода от антропогенных источников и источников, обусловленных горением биомассы способствовало сокращению снежного покрова в высокогорной Азии (Li et al., 2016; Zhang et al., 2018) и Южной Америке (Molina et al., 2015). Эффекты прямого и обратного воздействия черного углерода влияют на продолжительность залегания снежного покрова, его высоту и скорость таяния ледяного покрова Гренландии (Kang et al., 2020). В то же время в Арктике в последние десятилетия количество светопоглощающей сажи в снеге сокращается, что указывает на то, что обусловленный ею нагрев не является основной причиной изменений снежного и ледяного покрова, а также альбедо поверхности этого региона с 1980-х годов, см. рис. 1.1.1.7, а также (Zhang et al., 2019).

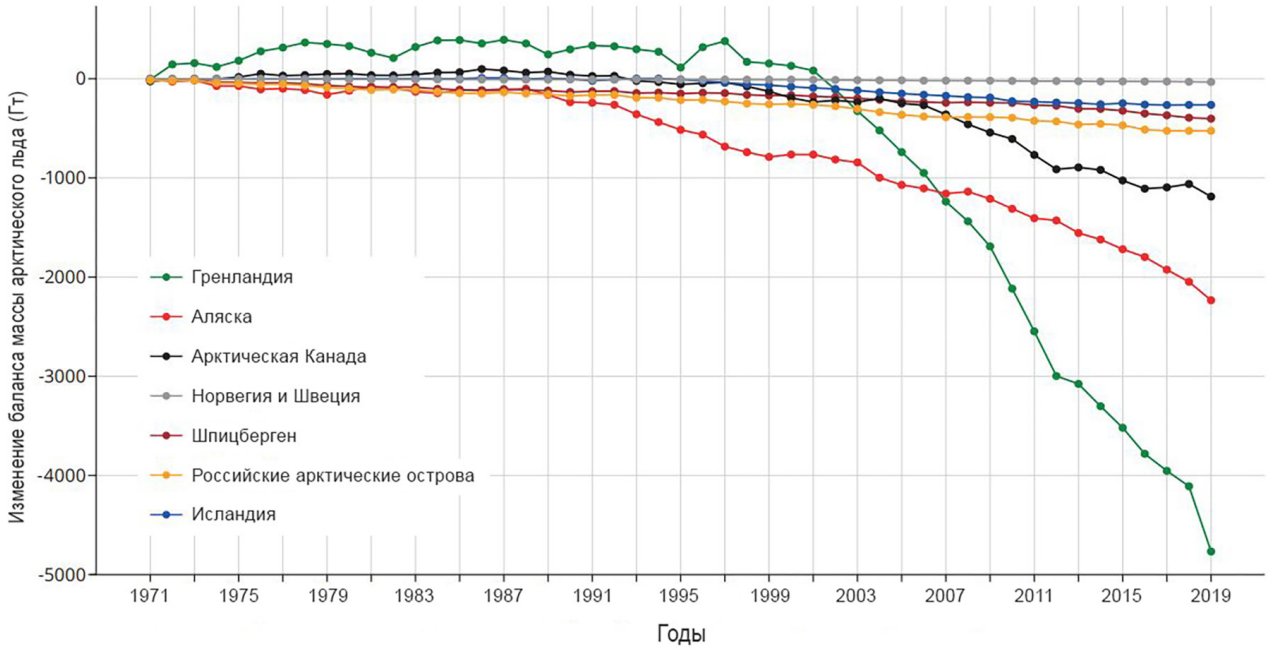



***Рис. 1.1.1.7*** *Изменение баланса массы арктического льда на суше в 1971-2019 гг. (AMAP, 2021)*

Увеличение средней потери массы ледников в глобальном масштабе по оценке, приведенной в работе (Zemp et al., 2019), составило примерно 30% в период с 1986-2005 по 2006-2015 гг.

Весьма вероятно, что потепление атмосферы является основным фактором, определяющим глобальное отступление ледников (Marzeion et al., 2014; Vuille et al., 2018). Имеются отдельные доказательства того, что антропогенное увеличение выбросов парниковых газов способствовало наблюдаемым изменениям массы (Hirabayashi et al., 2016). По подсчетам, антропогенная доля потери массы всех ледников за пределами Гренландии и Антарктиды увеличилась с 25 ± 35% в 1851-2010 гг. до 69 ± 24% в 1991-2010 гг. (Marzeion et al., 2014).

Скорость таяния ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды быстро увеличивается.

Общая потеря массы антарктического льда увеличилась с 40 ± 9 Гт/год в 1979-1990 гг. до 166 ± 18 Гт/год в 1999-2009 гг. и 252 ± 26 Гт/год

в 2009-2017 гг. В 2009-2017 гг. масса льда особенно интенсивно уменьшалась в секторах морей Амундсена и Беллинсгаузена в Западной Антарктиде (159 ± 8 Гт/год), у побережья Земли Уилкса в Восточной Антарктиде (51 ± 13 Гт/год), а также у западных и северо-восточных берегов материка (42 ± 5 Гт/год) (Rignot et al., 2019).

В Гренландии потеря льда оценивалась в 2000 г. в 443 ± 44 Гт/год, в 2005 г. достигла 500 ± 50 Гт/год, а в течение 2005-2019 гг. оставалась стабильной на уровне от 483 до 505 ± ~50 Гт/год (Mankoff et al., 2020). Таким образом, деградация Гренландского щита в последние годы усиливается: в настоящее время это приводит к повышению среднего уровня моря примерно на 0,7 мм/год[1]. При этом в отдельные сезоны оно существенно выше, например, за два аномально теплых летних месяца 2019 г. Гренландия потеряла 600 Гт льда, что, по оценкам, вызвало подъем уровня Мирового океана на 2,2 мм (Velicogna et al., 2020).

С высокой степенью достоверности температура верхнего слоя многолетней мерзлоты с начала 1980-х годов в большинстве регионов повысилась, хотя темпы потепления варьировались в зависимости от региона, что связано с повышением температуры воздуха и изменениями в снежном покрове (IPCC, 2019). Редкие и неравномерно распределенные измерения с высокой степенью достоверности показывают повышение температуры многолетней мерзлоты в последнее десятилетие: в зоне сплошной многолетней мерзлоты она повысилась на 0,39 ± 0,15 °C, прерывистая мерзлота за этот же период прогрелась на 0,20 ± 0,10 °C, горная – на 0,19 ± 0,05 °C, а мерзлота в Антарктиде – на 0,37 ± 0,10 °C. В глобальном масштабе температура многолетней мерзлоты повысилась на 0,29 ± 0,12 °C (Biskaborn et al., 2019). В то же время с 1970-х годов многолетняя мерзлота в Арктике прогрелась на 2-3 °C (AMAP, 2021). Наблюдаемая тенденция следует за арктическим усилением повышения температуры воздуха в Северном полушарии. Однако в зоне прерывистой мерзлоты температура почвы повысилась из-за увеличения толщины снега, а температура воздуха осталась статистически неизменной (Biskaborn et al., 2019).

**Уровень Мирового океана**

Подъем уровня Мирового океана продолжается, при этом тенденция к ускорению этого процесса сохраняется. За весь XX век он составил примерно 17 см, и далее возрастал с 3,04 мм/год в течение десятилетнего периода 1997-2006 гг. до 4,36 мм/год в последующий десятилетний период 2007-2016 гг. (WMO, 2019), а по данным серии работающих с начала 1990-х годов спутников, за последние 10 лет уровень моря поднимался в среднем на 4,8 мм в год (Voosen, 2020)[2]. Средний уровень моря поднялся примерно на 90 мм с начала 1990-х годов (рис. 1.1.1.8).

Повышение уровня моря чувствительно к температуре поверхности океана: в годы Эль-Ниньо, когда температура немного выше, оно, как правило, происходит быстрее, чем в годы Ла-Нинья. Так, уровень моря заметно повышался с 2014 по 2016 г. Однако эти относительно небольшие колебания не нарушили общую тенденцию долговременных изменений.

[1] go.nature.com/3mrkuw8

[2] В среднем с начала 1993 года по настоящее время глобальная средняя скорость повышения уровня моря, по данным альтиметрии, составляла 3,3 ± 0,3 мм/год (WMO, 2021).

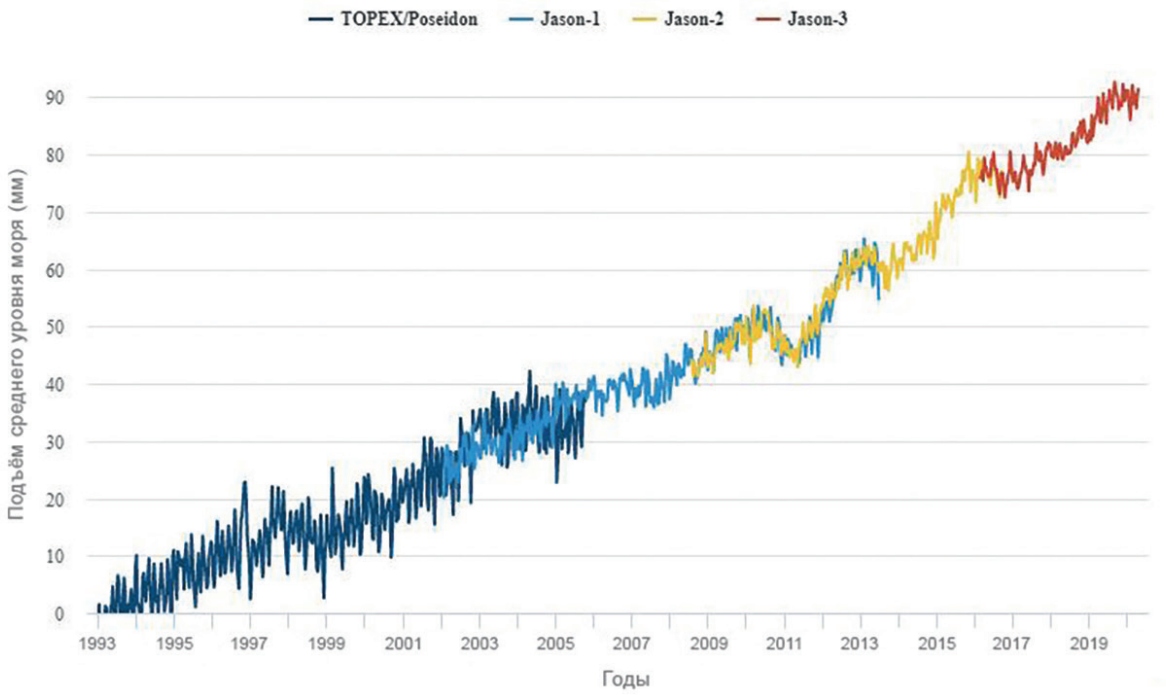



***Рис. 1.1.1.8*** *Повышение глобального среднего уровня моря на основе спутниковых данных NOAA (по результатам миссий TOPEX/Poseidon и Jason) с января 1993 года по настоящее время*
*Добавлена поправка на глобальный средний изостатический отскок 0,3 мм/год.*
*График Carbon Brief с использованием Highcharts*[1]

Подъем уровня Мирового океана обусловлен сочетанием двух факторов: таяния ледяного покрова (ледников и ледниковых щитов) и теплового расширения воды при ее нагревании (по современным оценкам, их вклад составляет 70 и 30% соответственно). Первоначально в этом процессе главная роль принадлежала тепловому расширению океанской воды, но начиная примерно с 2000 года таяние ледников и разрушение ледниковых щитов Антарктики и Гренландии превысили эффекты теплового расширения и продолжают доминировать до настоящего времени. С 1970 года антропогенное воздействие стало основной причиной ускоренного повышения уровня моря в глобальном масштабе (WMO, 2019) и наблюдаемого повышения температуры поверхности океана, которое распространяется и на его более глубокие слои (IPCC, 2021).

**Морской лед**

В Северном Ледовитом океане наблюдается уменьшение площади морского льда, наиболее сильное в сентябре – 13,1% за десятилетие к 2020 г.[2] относительно среднего показателя 1981-2010 гг. Кроме того, арктический морской лед становится моложе и тоньше (рис. 1.1.1.9).

В отличие от Северного Ледовитого океана, площадь и объем морского льда в Южном океане не демонстрируют существенной тенденции к изменениям, что может быть связано с региональными особенностями и большой собственной изменчивостью (IPCC, 2021).

[1] https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-first-quarter-of-2020-is-second-warmest-on-record?fbclid=IwAR0cU73jSVz2dnKTtfQQYSmpKqN20IpvShgd269Rp6tMmqh-oMuE3W4NtCM
[2] В 2021 г. значение этого тренда понизилось до 12,7 % (NSIDC, 2021: https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/10/)

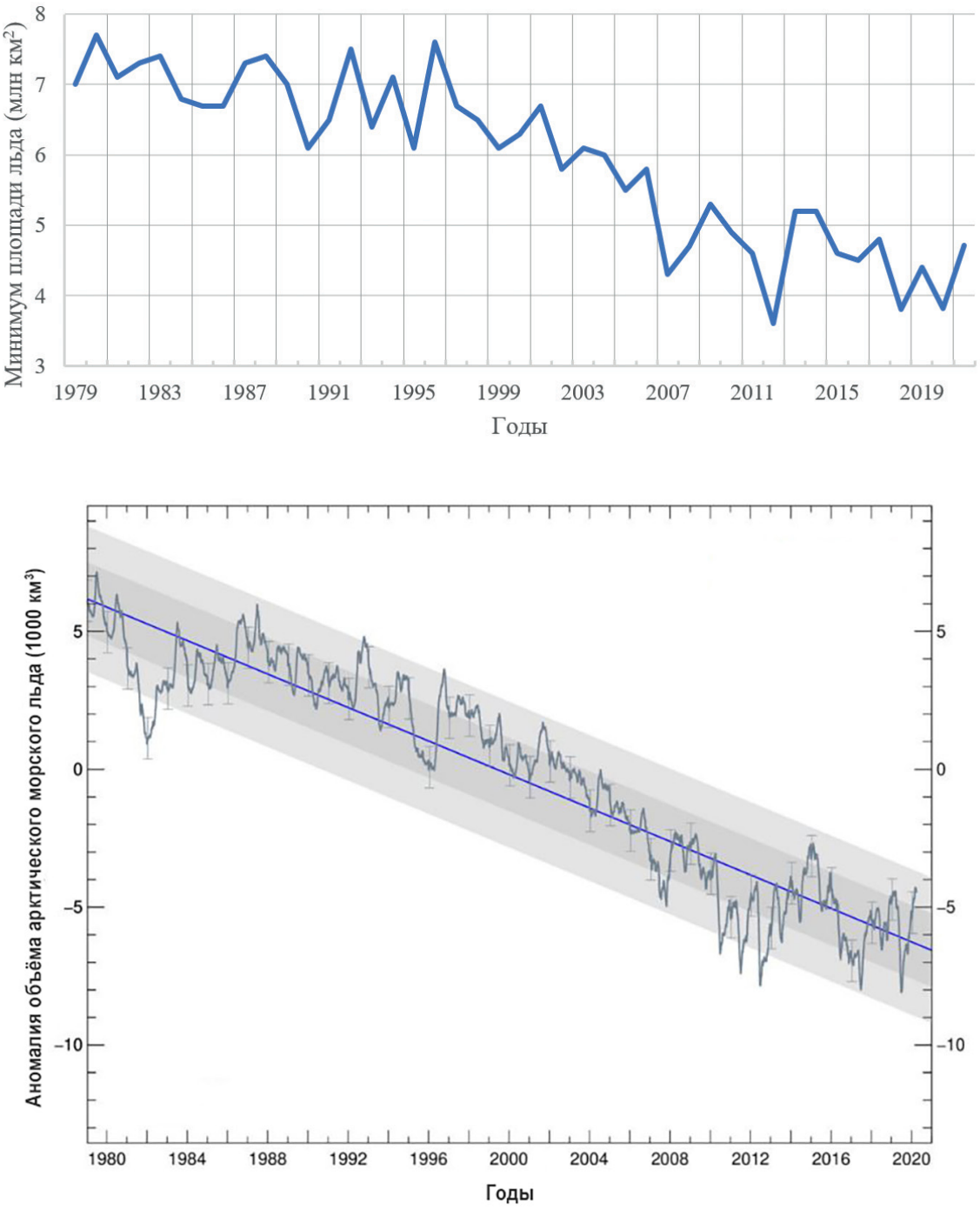



***Рис. 1.1.1.9*** *Минимальная (сентябрьская) площадь арктического морского льда в период 1979-2021 гг. (наверху) по данным Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC). Аномалии объема арктического морского льда в период 1979-2020 гг. по данным PIOMAS[1] (внизу)*

**Соленость океана**

Соленость значительно различается в разных частях Мирового океана. Отмечается опреснение северного и западного бассейнов Тихого океана и повышение максимумов солености в субтропической Атлантике. Влияние человека способствовало наблюдаемым изменениям солености приповерхностных и подповерхностных слоев океана с середины XX века (IPCC, 2021). Послед-

[1] https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-first-quarter-of-2020-is-second-warmest-on-record?fbclid=IwAR0cU73jSVz2dnKTtfQQYSmpKqN20IpvShgd269Rp6tMmqh-oMuE3W4NtCM

ние исследования указывают на рост контраста между соленостью поверхностного и подповерхностного слоев океана. Предполагается, что различия между регионами с высокой и низкой соленостью связаны с интенсификацией глобального гидрологического цикла. Согласно данным, полученным в основном с буев Арго, разница между средней соленостью верхнего двухкилометрового слоя в регионах с ее наибольшим и наименьшим значениями выросла на 1,9% ± 0,6% с 1960 по 1990 г. и на 3,3% ±0,4% с 1991 по 2017 г. (5,2% ± 0,4% за 1960-2017 гг.), причем этот рост связан с антропогенным воздействием (Cheng et al., 2020).

### Кислотность вод Мирового океана

В поверхностном слое океана водородный показатель *pH* снизился по сравнению с доиндустриальным периодом в основном в результате поглощения углекислого газа. Согласно оценкам, сделанным на основе рядов наблюдений за 15 и более лет, скорость снижения *pH* (т. е. закисления вод Мирового океана) составила 0,017-0,027 единиц за десятилетие[1].

### Экстремальность климата

Сохраняется тенденция последних десятилетий к увеличению числа опасных гидрометеорологических явлений. При этом согласно статистике страховых агентств (рис. 1.1.1.10), оценивающих степень опасности по размеру нанесенного материального ущерба, основной вклад в такое увеличение вносят наводнения (осадки) и погодные катаклизмы, вызванные в первую очередь ветром (ураганы, штормы, смерчи, торнадо и пр.)[2].

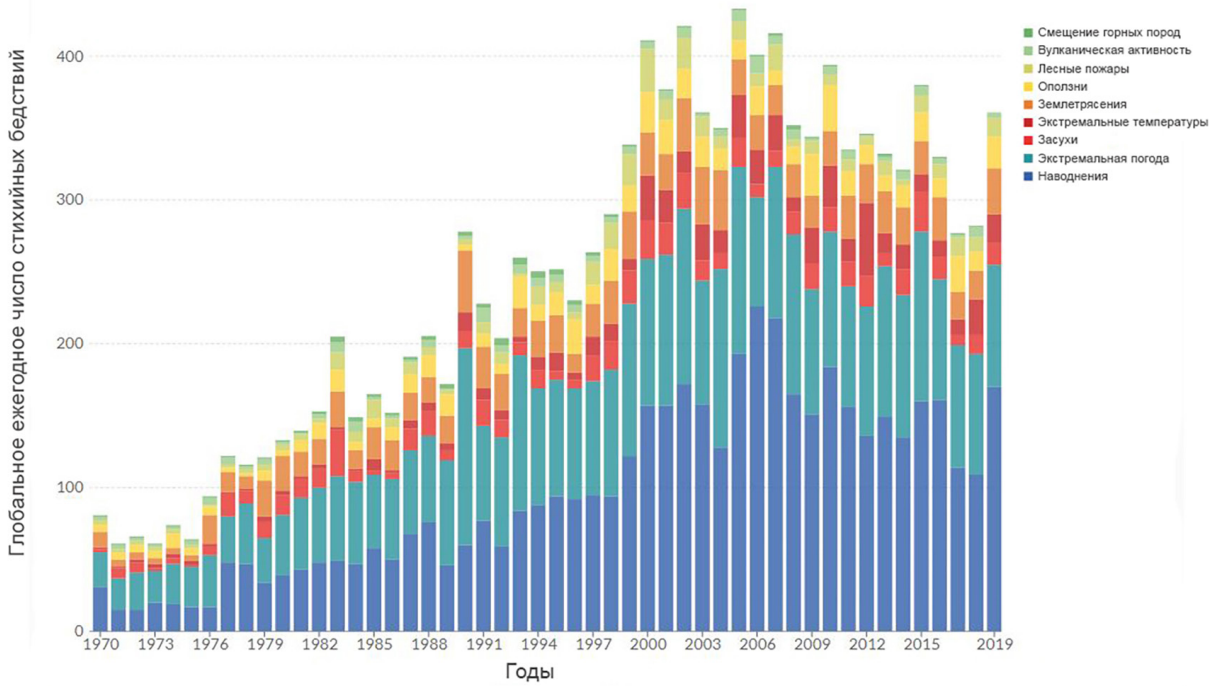



***Рис. 1.1.1.10*** *Число опасных природных явлений, нанесших значительный материальный ущерб в период 1970-2019 гг.*[3]

[1] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/09_SROCC_Ch05_FINAL-1.pdf

[2] Следует отметить, что к росту ущербов приводят не только погодно-климатические факторы, но и возрастающая уязвимость инфраструктуры. Это может быть связано с высокой степенью ее износа; несоблюдением строительных норм и правил; освоением территорий, находящихся в зоне повышенного погодно-климатического риска, и др. (Росгидромет, 2017).

[3] https://ourworldindata.org/grapher/natural-disasters-by-type

Существует высокая степень уверенности в том, что основным фактором наблюдаемого увеличения вероятности и опасности экстремальных явлений в глобальном и континентальном масштабах было увеличение выбросов парниковых газов, частично компенсируемое увеличением количества аэрозолей (IPCC, 2021). В то же время каждый тип погодных аномалий обладает собственной «индивидуальностью», и его особенности необходимо анализировать отдельно от остальных. Это главным образом вызвано тем, что за возникновение тех или иных погодных катаклизмов «ответственны» разные цепочки развивающихся в климатической системе процессов. Эти цепочки изучены с разной степенью подробности, что и отражается на достоверности наших знаний в приложении к каждому отдельному случаю.

Согласно исследованиям, от современных антропогенных изменений климата в наибольшей степени зависит возникновение волн тепла и холода, засух и сильных ливней (рис. 1.1.1.11, а также (NASEM, 2016; Fowler et al., 2021)).

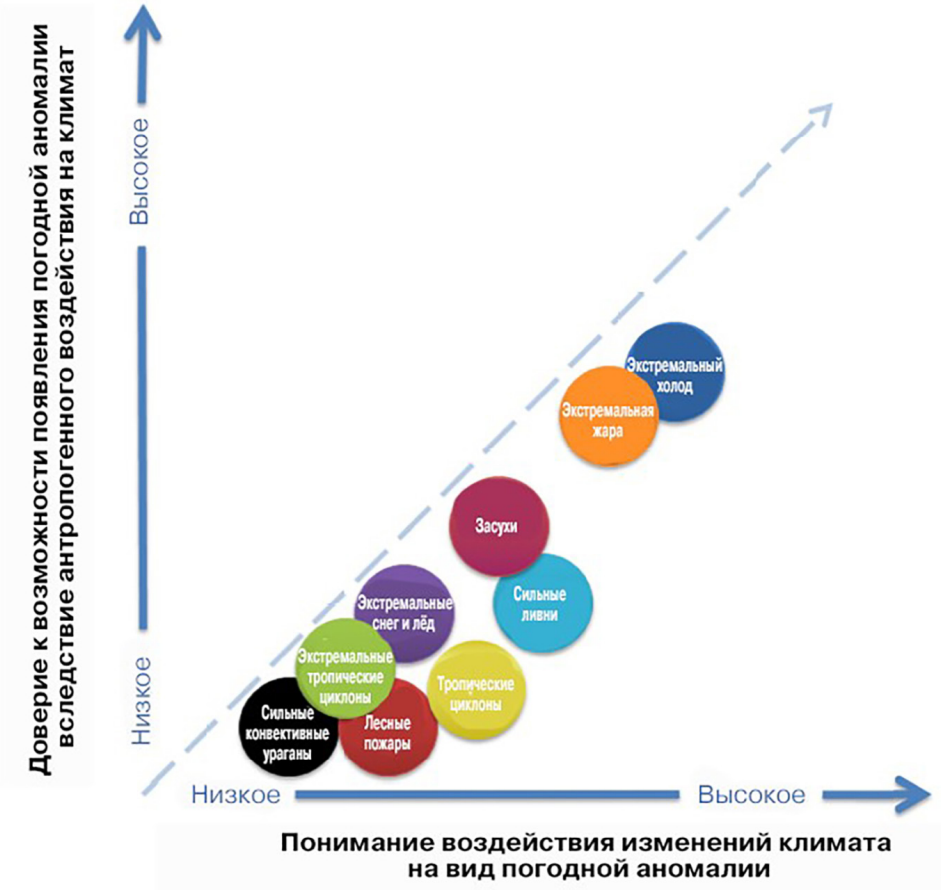



***Рис. 1.1.1.11*** *Схема, иллюстрирующая соотношение между современным пониманием воздействия изменений климата на отдельные виды погодных аномалий и вероятной причастностью антропогенного влияния на возникновение этих аномалий (согласно (NASEM, 2016)*

*Область под биссектрисой показывает потенциал для улучшения установления причин изменения статистики погодных аномалий за счет совершенствования моделей, привлечения дополнительных данных и пр. Чем дальше от начала координат и ближе к биссектрисе, тем выше уровень связи. Кружки, определяющие различные типы аномалий, не могут располагаться над биссектрисой, так как в этом случае оказалось бы, что установление наличия аномалии произошло при отсутствии адекватного понимания причинно-следственной связи, ее породившей*

В последние годы волны тепла были самой смертоносной метеорологической опасностью; наибольшие экономические потери были связаны с тропическими циклонами (WMO, 2019). Наметилась тенденция к расширению зоны лесных пожаров: наряду с традиционными пожароопасными регионами – Австралией, Сибирью, лесами Амазонии – они охватили беспрецедентно большие площади в Арктике, доселе не подвергавшиеся возгоранию.

**Причины наблюдаемых изменений климата**

Расширяющийся круг исследований (см., например, Росгидромет, 2014), использующих формальные статистические методы выделения вклада отдельных внешних воздействий в наблюдаемое глобальное потепление, показывает, что вклад антропогенного роста атмосферной концентрации парниковых газов в температурный тренд с середины XX века был наибольшим (больше наблюдаемого тренда), а суммарное воздействие остальных факторов только ослабляло рост температуры. Гипотезы о доминирующей роли естественных климатических факторов в наблюдаемых температурных изменениях не находят надежных научных подтверждений (Росгидромет, 2014; 2017).

Согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК (IPCC, 2021), не вызывает сомнений тот факт, что разогрев атмосферы, океана и суши произошел под влиянием человека. Произошли широкомасштабные и быстрые изменения в атмосфере, океане, криосфере и биосфере. Масштабы недавних изменений в климатической системе в целом и нынешнее состояние многих ее частей беспрецедентны на протяжении многих столетий и тысячелетий. Антропогенное изменение климата уже влияет на многие погодные и климатические экстремальные явления во всех регионах земного шара. Доказательства происходящих изменений экстремальных явлений, таких как волны тепла, обильные осадки, засухи и тропические циклоны, и, в частности, связь этих изменений с антропогенным фактором усилились со времени публикации Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013).

## Список литературы


**Бардин М. Ю., Ранькова Э. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., Корнева И. А., 2020:** Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 29-45.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.) – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / (Катцов В. М., ред.) – СПб.: Росгидромет, 2017. – 105 с.

**Росгидромет, 2021:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год – М.: Росгидромет. – 104 с. https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad_klimat2020.pdf

**AMAP, 2021:** Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts, Summary for Policy-Makers. https://www.amap.no/documents/download/6730/inline

**Azorin-Molina C., Dunn R. J. H., Mears C. A., Berrisford P., McVicar, T. R., Nicolas J. P., 2019:** Surface winds. «State of the Climate in 2018» // Bulletin of the American Meteorological Society, v. 100(9), pp. S43–S45. https://doi.org/doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.

**Betts R. A., Jones C. D., Knight J. R., Keeling R. F., Kennedy J. J., 2016:** El Niño and a record $CO_2$ rise // Nature Climate Change. https://doi.org/10.1038/nclimate3063

**Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D. A., Schoeneich P., Romanovsky V. E., Lewkowicz A. G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W. L., Christiansen H. H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., N. Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H., 2019:** Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications, v. 10, No. 1, pp. 264-274, doi:10.1038/s41467-018-08240-4.

**Cheng L., Trenberth K. E., Gruber N., Abraham J. P., Fasullo J. T., Li G., Mann M. E., Zhao X., Zhu J., 2020:** Improved Estimates of Changes in Upper Ocean Salinity and the Hydrological Cycle // Journal of Climate, v. 33, pp. 10357-10381, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0366.1.

**Clem K. R., Fogt R. L., Turner J., Lintner B. R., Marshall G. J., Miller J. R., Renwick J. A., 2020:** Record warming at the South Pole during the past three decades // Nature Climate Change, v. 10, pp. 762-770. file:///C:/Users/Andy/AppData/Local/Temp/s41558-020-0815-z.pdf

**DEL, 2001: Willmott C. J., Matsuura K., 2001:** Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950-1999). Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware. http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.ghcn_ts2.html

**ERA-5, 2020:** Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C. S., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M. G., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Holm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thepaut J., 2020: The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 146, pp. 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

**Fowler H. J., Lenderink G., Prein A. F. Westra S., Allan R. P., Ban N., Barbero R., Berg P., Blenkinsop S., Do H. X., Guerreiro S., Haerter J. O., Kendon E. J., Lewis E., Schaer C., Sharma A., Villarini G., Wasko C., Zhang X., 2021:** Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes // Nature Reviews Earth & Environment. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6

**Garfinkel C. I., Gordon A., Oman L. D., Li F., Davis S., Pawson S., 2018:** Nonlinear response of tropical lower-stratospheric temperature and water vapor to ENSO // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 18 (7), pp. 4597-4615. https://doi.org/10.5194/acp-18-4597-2018

**GISTEMP v4, 2019:** GISTEMP Team, 2019: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies, https://data.giss.nasa.gov/gistemp/

**Grise K. M., Davis S. M., 2020:** Hadley cell expansion in CMIP6 models // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 20 (9), pp. 5249-5268. https://doi.org/10.5194/acp-20-5249-2020

**Grise K., Davis S., Staten P., Adam O., 2018:** Regional and Seasonal Characteristics of the Recent Expansion of the Tropics // Journal of Climate, v. 31 (17), doi: 10.1175/JCLI-D-18-0060.1

**HadCRUT4, 2012: Morice C. P., Kennedy J. J., Rayner N. A., Jones P. D., 2012:** Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset // Journal of Geophysical Research, v. 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187.

**Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D., 2020:** Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded 33 multivariate climate dataset // Nature Scientific Data, v. 7 (1), 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3.

**Hirabayashi Y., Nakano K., Zhang Y., Watanabe S., Tanoue M., Kanae S., 2016:** Contributions of natural and anthropogenic radiative forcing to mass loss of Northern Hemisphere mountain glaciers and quantifying their uncertainties // Nature Scientific Reports, v. 6, 29723. doi:10.1038/srep29723.

**IPCC, 2013: Summary for Policymakers. Climate Change 2013:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3-29) / T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (Eds.) – Cambridge University Press.

**IPCC, 2019:** IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate /H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)], 2019, 765 p.

**IPCC, 2021: Climate Change 2021:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. – Cambridge University Press. 3949 p. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

**JRA-55, 2015:** Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Morita M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II 93(1), pp. 5-48. doi: 10.2151/jmsj.2015-001, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/93/1/93_2015-001/_article

**Kang S., Zhang Y., Qian Y., Wang H., 2020:** A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere // Earths-Science Reviews, 12 p., https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346

**Knutson T. R., Zeng F., 2018:** Model assessment of observed precipitation trends over land regions: Detectable human influences and possible low bias in model trends // Journal of Climate, v. 31 (12), pp. 4617-4637. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0672.1

**Lee J., Sperber K. R., Gleckler P. J., Bonfils C. J. W., Taylor K. E., 2019:** Quantifying the agreement between observed and simulated extratropical modes of interannual variability // Climate Dynamics, v. 52, pp. 4057-4089. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4355-4

**Li C., Bosch C., Kang S., Andersson A., Chen P., Zhang Q., Cong Z., Chen B., Qin D., Gustafsson Ö., 2016:** Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers // Nature Communications, v. 7 (1), 12574. doi:10.1038/ncomms12574

**Li Q., Sun W., Yun X., Huang B., Dong W., Wang X. L., Zhai P., Jones P., 2021:** An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST // Climate Dynamics, v. 56, pp. 635-650.

**Mankoff K. D., Solgaard A., Colgan W., Ahlstrøm A. P., Khan S. A. Fausto R. S., 2020:** Greenland Ice Sheet solid ice discharge from 1986 through March 2020 // Earth System Science Data, 12, pp. 1367-1383. https://doi.org/10.5194/essd-12-1367-2020

**Manney G. L., Hegglin M. I., 2018:** Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // Journal of Climate, v. 31(1), pp. 423-448. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0303.1

**Marty C., Tilg A.-M., Jonas T., 2017:** Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps // Journal of Hydrometeorology, v. 18, Issue 4, pp. 1021-1031. doi:10.1175/JHM-D-16-0188.1.

**Marzeion, B., Jarosch A. H., Gregory J. M., 2014:** Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change // The Cryosphere, v. 8 (1), pp. 59-71, doi:10.5194/tc-8-59-2014

**Mastrandrea M. D., Mach K. J., Plattner G-K., Edenhofer O., Stocker T. F., Field C. B., Ebi K. L., Matschosset P. R., 2011:** The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: A common approach across the working groups // Climatic Change, v. 108, pp. 675-691.

**MERRA-2, 2017:** Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyk G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B., 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of Climate, v. 30 (14), pp. 5419-5454. Retrieved Jan 21, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/14/jcli-d-16-0758.1.xml

**Molina L. T., Gallardo L., Andrade M., Baumgardner D., Borbor-Córdova M., Bórquez R., Casassa G., Cereceda-Balic F., Dawidowski L., Garreaud R., Huneeus N., Lambert F., McCarty J. L., Mc Phee J., Mena-Carrasco M., Raga G. B., Schmitt C., Schwarz J. P., 2015:** Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere // Earth's Future, 3, pp. 345-369, doi:10.1002/2015EF000311.

**NASEM, 2016:** National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change – Washington, DC: The National Academies Press,.144 p., doi: 10.17226/21852.

**NCEP/NCAR, 1996:** Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins, W. Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of American Meteorological Society, v. 77, pp. 437-470.

**Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., Manning M. R., Lowry D., Fisher R. E., France J. L., Michel S. E., Miller J. B., White J. W. C., Vaughn B., Bousquet P., Pyle J. A., Warwick N. J., Cain M., Brownlow R., Zazzeri G., Lanoisellé M., Manning A. C., Gloor E., Worthy D. E. J., Brunke E. G., Labuschagne C., Wolff E. W., Ganesan A. L., 2016:** Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift // Global Biogeochemical Cycles, v. 30, pp. 1356-1370.

**NOAAGlobalTemp, 2015:** Zhang H.-M., Huang B., Lawrimore J., Menne M., Smith T. M., NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 4.0. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5FN144H

**Rignot E., Mouginota J., Scheuchla B., van den Broeked M., van Wessemd M. J., Morlighem M., 2019:** Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979-2017 // Proceedings of the National Academy of Sciences, 9 p., www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1812883116.

**Skiles S. M. Flanner M., Cook J. M., Dumont M., Painter T. H., 2018:** Radiative forcing by light-absorbing particles in snow // Nature Climate Change, 8(11), pp. 964-971, doi:10.1038/s41558-018-0296-5.

**Velicogna I., Mohajerani Y., Landerer G. A. F., Mouginot J., Noel B., Rignot E., Sutterley T., van den Broeke M., van Wessem M., Wiese D., 2020:** Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica From the GRACE and GRACE Follow-On Missions // Geophysical Research Letters. https://doi.org/10.1029/2020GL087291

**Voosen P., 2020:** Seas are rising faster than ever // Science, v. 370, Issue 6519, p. 901, doi: 10.1126/science.370.6519.901.

**Vuille M., Carey M., Huggel C., Buytaert W., Rabatel A., Jacobsen D., Soruco A., Villacis M., Yarleque C., Timm O. E., Condom T., Salzmann N., Sicart J.-E., 2018:** Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead // Earth-Science Review, v. 176, pp. 195-213, doi:10.1016/j.earscirev.2017.09.019.

**WMO, 2018:** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report № 58, Geneva, Switzerland, 588 pp. https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-05/SAP-2018-Assessment-report.pdf.

**WMO, 2019:** The Global Climate in 2015-2019, 24 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936

**WMO, 2021:** State of the Global Climate 2020 – WMO, № 1264, 56 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

**Zhang, Y., Kang, S., Sprenger, M., Cong, Z., Gao, T., Li, C., Tao, S., Li, X., Zhong, X., Xu, M., Meng, W., Neupane, B., Qin, X., Sillanpää, M., 2018:** Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau // The Cryosphere, v. 12, pp. 413-431, https://doi.org/10.5194/tc-12-413-2018

**Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P. J., Wang X., 2019:** Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s. // Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, № 48, pp. 23947-23953, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1915258116

**Zemp, M. Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G., 2019:** Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature, v. 568 (7752), pp. 382-386, doi:10.1038/s41586-019-1071-0.

## 1.1.2 Сценарные прогнозы

***В. П. Мелешко, В. А. Говоркова, Т. В. Павлова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник***

### 1.1.2.1 Глобальные климатические модели CMIP6

Широкомасштабное международное сотрудничество в области оценки качества климатических моделей и их компонентов, а также сценарного прогнозирования климата уже более 30 лет продолжается в форме проектов взаимосравнений моделей, разрабатываемых в разных центрах по всему миру. Проекты сравнения моделей достаточно полно представляют основные аспекты верификации климатических моделей. Они позволяют: документировать качество воспроизведения моделями современного климата; сравнивать способность моделей воспроизводить «возмущенные» состояния климатической системы; определять недостатки, присущие моделям как классу; основываясь на анализе этих недостатков, формулировать гипотезы относительно их причин; делать заключения относительно влияния на качество модельных расчетов используемых численных методов, модельного разрешения и параметризаций; предлагать численные эксперименты для выяснения причин и устранения недостатков моделей; документировать изменения модели.

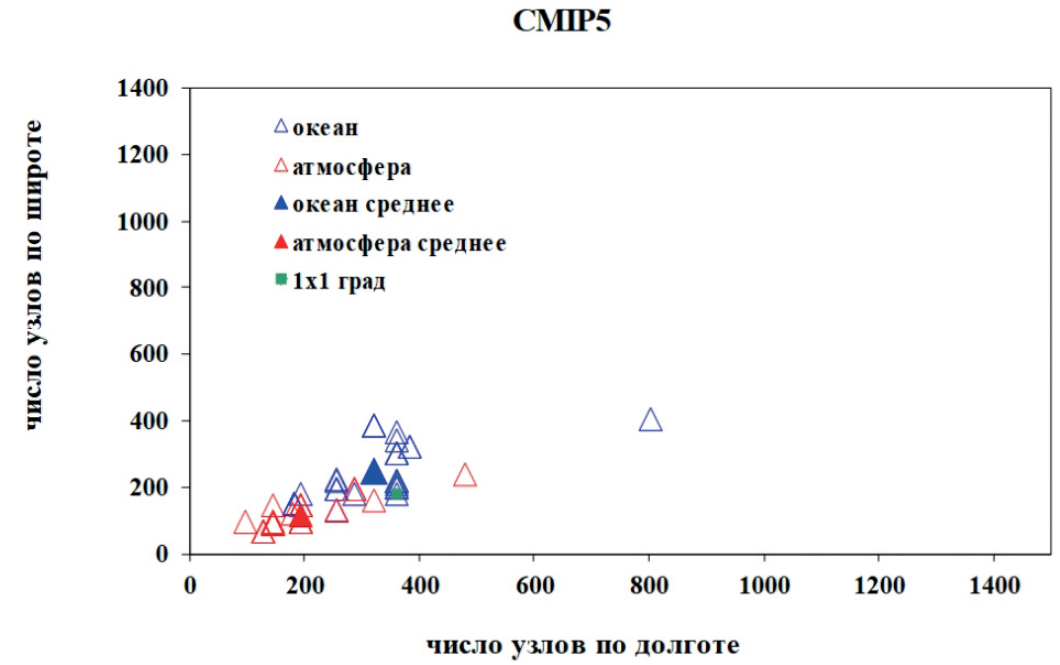
Наиболее известным международным проектом сравнения моделей является Проект сравнения объединенных моделей (атмосферы и океана) CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Именно этот проект, организованный в рамках Всемирной программы исследований климата[1], начиная с первой своей фазы, является основным источником сценарных прогнозов изменения климата для Оценочных докладов МГЭИК. В рамках подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) с помощью ансамбля моделей, участвовавших в пятой фазе проекта (CMIP5) (Taylor et al., 2012), были выполнены расчеты климата XXI века для различных сценариев антропогенных выбросов (van Vuuren et al., 2011). Результаты этих расчетов явились основой многих исследований по оценке последствий изменений климата для территории России (см., например, Катцов, Говоркова, 2013; Мелешко, Говоркова, 2013; Павлова, Катцов, 2013; Павлова и др., 2013; Спорышев, Говоркова, 2013), которые нашли отражение во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). В настоящее время проект CMIP находится в шестой фазе (CMIP6) (Eyring et al., 2016).

С начала 1990-х годов число глобальных климатических моделей росло с впечатляющей скоростью и превысило сотню в CMIP6. Зачастую существенное увеличение числа моделей в CMIP6 происходило в результате того, что некоторые центры были представлены в проекте несколькими моделями.

Одновременно с ростом числа моделей, участвующих в CMIP, улучшались их пространственное разрешение (рис. 1.1.2.1) и физическая полнота.

[1] https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip

а)




б)

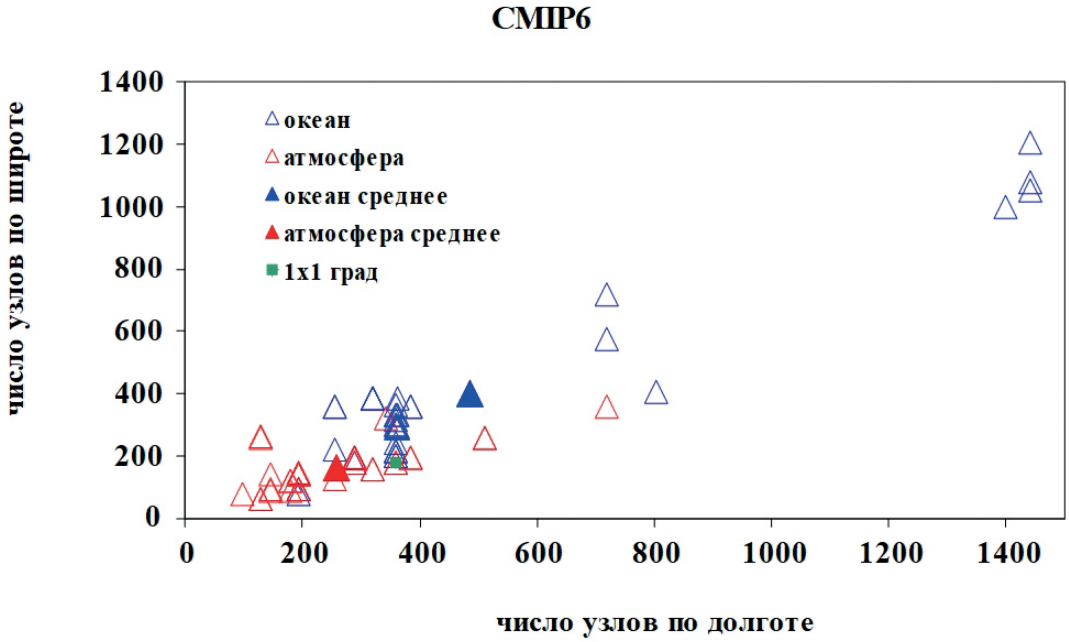



***Рис. 1.1.2.1*** *Сравнение горизонтального разрешения (числа узлов сетки по широте и долготе) для атмосферного (незакрашенные красные треугольники) и океанического (незакрашенные синие треугольники) блоков моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP5 (а) и CMIP6 (б). Закрашенные треугольники – среднее значение по ансамблям из 31 модели CMIP5 и 37 моделей CMIP6. Зеленый квадрат – широтно-долготное разрешение 1°×1° (Катцов и др., 2022)*

По сравнению с ансамблем CMIP5, разброс оценок глобального потепления к концу XXI века (по отношению к принятому в Шестом оценочном докладе МГЭИК базовому периоду 1995-2014 гг.) в ансамбле CMIP6 оказался больше, примерно на 20% (Lee et al., 2021). Этот разброс увеличился главным образом из-за повышения его верхней границы, что связывается с возросшей чувствительностью ряда климатических моделей (Meehl et al., 2020; Tokarska et al., 2020; Zelinka et al., 2020). Последнее обстоятельство, по мнению ряда исследователей, являет-

ся следствием повышения пространственного разрешения моделей. Все это вновь возвращает научное сообщество к проблеме формирования модельных ансамблей и возможности «взвешивания» результатов моделей, входящих в ансамбль, в зависимости от их «качества» (Росгидромет, 2014).

Как известно (Росгидромет, 2008), наиболее высокую успешность воспроизведения средних климатических характеристик при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по ансамблю моделей (рис. 1.1.2.2).

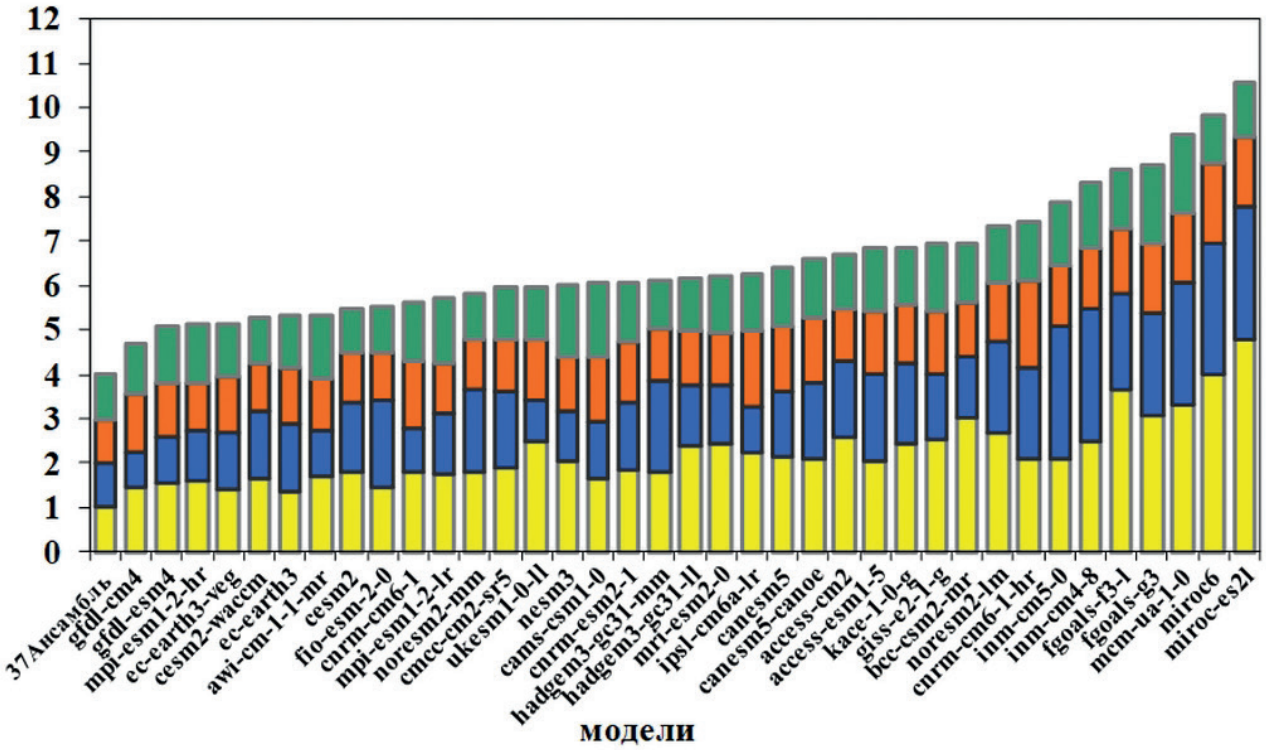



***Рис. 1.1.2.2*** *Средние за год среднеквадратические отклонения температуры приземного воздуха на континентах (оранжевый цвет), температуры поверхности океанов (синий цвет), количества осадков (зеленый цвет) и атмосферного давления на уровне моря (желтый цвет), рассчитанные по 37 моделям CMIP6 в северном полушарии для периода 1995-2014 гг.*

*Отклонения отдельных переменных для каждой модели нормированы на соответствующие отклонения, вычисленные по ансамблю из 37 моделей, и суммированы по четырем указанным переменным*

Модели ранжированы в порядке ухудшения качества. При вычислении средних квадратических отклонений использованы: для температуры приземного воздуха и температуры поверхности океанов – данные наблюдений (CRU-4, 2020; Rayner et al., 2003), для давления и осадков – данные реанализа (ERA-5, 2020). (Катцов и др., 2022)

Для некоторых климатических характеристик, воспроизводимых отдельными моделями, это может быть и не так. Это обычно объясняют тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются. В то время как эксперименты с единственной моделью чрезвычайно важны для проверки новых научных гипотез и теорий, мультимодельные ансамбли позволяют дополнитель-

но оценивать устойчивость (робастность) и воспроизводимость новых результатов, а также оценивать их неопределенность, связанную с собственной структурой модели и генерируемой ею изменчивостью процессов (Hawkins, Sutton, 2009).

Как отмечалось во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), в настоящее время, по-видимому, нет достаточных оснований для того, чтобы автоматически переносить указанное превосходство «средней» модели над отдельными членами ансамбля на оценки будущих изменений климата. Научное сообщество ощущает потребность в создании системы показателей (на основе сравнения модельных расчетов с данными наблюдений), которые позволили бы количественно оценивать совокупное качество каждой модели, а не ограничиваться оценками качества расчетов той или иной климатической характеристики в отдельности.

В последние годы для разработки таких показателей (метрик), позволяющих ранжировать модели с точки зрения достоверности рассчитываемых с их помощью будущих состояний климатической системы и, соответственно, распределять веса между моделями в ансамблевых расчетах, было приложено много усилий (Knutti et al., 2017; Olson et al., 2018; Abramowitz et al., 2019). Однако на сегодняшний день консенсус относительно оптимального подхода при формировании ансамбля не достигнут (Weigel et al., 2010; Herger et al., 2018). По-прежнему неясно, возможна ли в принципе разработка системы метрик, которая стала бы общепринятой (как, например, в численном прогнозе погоды), и позволила ли бы такая система «взвешивать» члены мультимодельных ансамблей, или, по крайней мере, «объективно» устанавливать пригодность моделей для тех или иных целей (в том числе для тех или иных регионов) и исключать из мультимодельных ансамблей «непригодные» модели, а остальные члены использовать с одинаковыми весами (Павлова и др., 2014).

Дополнительные трудности «объективной дискриминации» моделей обусловлены тем, что для разных климатических характеристик или в разных регионах достоверность данных, используемых для оценки качества моделей, неодинакова, особенно когда для таких сравнений используются реанализы (при всем техническом удобстве, обусловленном их регулярными сетками). Результаты сравнений оказываются в той или иной степени чувствительными к выбору реанализа, а также рассматриваемого временного периода.

С учетом вышеизложенного в рассматриваемых в настоящей работе сценарных прогнозах климата на территории России используется весь доступный к началу проведения анализа ансамбль CMIP6 (до 37 моделей), в котором все модели представлены с равным весом.

Оценка качества и проблемы формирования модельных ансамблей, вопросы обнаружения и установления причины наблюдаемых изменений климата, а также глобальные прогнозы для разных временных горизонтов с использованием ансамбля моделей CMIP6 подробно рассматриваются в Шестом оценочном докладе МГЭИК (Eyring et al., 2021; Lee et al., 2021).

### 1.1.2.2 Сценарии воздействия на климатическую систему

Сценарии представляют собой ключевой компонент исследования глобальных климатических изменений. Они дают основу для понимания сложных взаимодействий климатической системы, экосистем, хозяйственной деятельности и условий жизни людей. Сценарии описывают возможные варианты развития событий в следующих основных областях: в социально-экономической сфере, в области технологического развития, в сфере окружающей среды, в области эмиссий парниковых газов и аэрозолей и в области климата.

Начиная с 2010 года (Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2012) сообщество разработчиков сценариев было вовлечено в создание новой сценарной структуры: SSP (Shared Socioeconomic Pathway; Путь совместного социально-экономического развития) – RCP (Representative Concentration Pathway; Репрезентативная траектория концентраций атмосферных примесей).

Пути совместного социально-экономического развития описывают вероятные альтернативные сценарии эволюции общества и экосистем в XXI веке, а репрезентативные траектории концентраций показывают сценарные временные ряды эмиссий и концентраций всего набора парниковых газов, аэрозолей и химически активных газов, а также изменения в землепользовании. Структура SSP-RCP отличается от предыдущих подходов к построению климатических сценариев тем, что построение альтернативных вариантов социально-экономического и климатического будущего происходит параллельно, а затем они объединяются для проведения комплексного исследования. Построение сценариев проводилось с помощью комплексных оценочных моделей. Было выделено пять путей социально-экономического развития, существенно различающихся по усилиям, необходимым для смягчения антропогенных климатических воздействий и адаптации к ним (Riahi et al., 2017). Для каждого пути в терминах широких социальных тенденций представлено текстовое описание того, как может складываться вероятное будущее. Краткое изложение этих описаний приведено ниже.

**SSP1: «Устойчивость (переход на зеленый путь)»**

Развитие идет по самодостаточному, рациональному и экологически чистому пути. Управление глобальным достоянием человечества постепенно улучшается, инвестиции в образование и здравоохранение ускоряют изменения в демографической структуре населения, а акцент на экономическом росте смещается в сторону более широкого внимания к благополучию людей. Сокращается неравенство как между странами, так и внутри них. Потребление ориентировано на низкий материальный прирост и меньшие ресурсо- и энергоемкость.

**SSP2: «Центральная часть дороги»**

Социальные, экономические и технологические тенденции в мире не отличаются заметно от исторических закономерностей. Развитие и рост доходов происходят неравномерно: одни страны добиваются прогресса, а другие не оправдывают ожиданий. Глобальные и национальные институты работают над достижением целей устойчивого развития, но делают это медленно. Экологические системы деградируют, хотя есть некоторые улучшения, и в целом интенсивность использования ресурсов и энергии снижается. Глобальный рост населения является умеренным и стабилизируется во второй половине века. Неравенство доходов сохраняется или уменьшается очень медленно, и остаются

проблемы, связанные с уязвимостью перед социальными и экологическими изменениями.

**SSP3: «Региональное соперничество (каменистая дорога)»**

Возрождающийся национализм, озабоченность по поводу конкурентоспособности и безопасности, а также региональные конфликты заставляют страны уделять все больше внимания внутренним или, в лучшем случае, региональным вопросам. Страны достигают целей энергетической и продовольственной безопасности в своих регионах за счет более всеобъемлющего развития. Снижаются инвестиции в образование и технологии. Экономическое развитие идет медленно, потребление остается материалоемким, а неравенство с течением времени сохраняется или увеличивается. Прирост населения низкий в промышленно развитых и высокий в развивающихся странах. Низкий международный приоритет решения экологических проблем приводит в некоторых регионах к деградации окружающей среды.

**SSP4: «Неравенство (разделенная дорога)»**

Различия в инвестициях в человеческий капитал в сочетании с растущим неравенством экономических возможностей и политической власти приводят к усилению неравенства и расслоения как между странами, так и внутри них. Увеличивается разрыв между сообществом стран, которые способствуют развитию наукоемких и капиталоемких секторов мировой экономики, и раздробленной совокупностью стран с низким уровнем образования и низкими доходами, которые работают в трудоемкой и низкотехнологической экономике. Социальная сплоченность снижается, а конфликты и беспорядки становятся все более обычным явлением. Глобальный энергетический сектор диверсифицируется за счет инвестиций как в углеродоемкие виды топлива, так и в низкоуглеродные источники энергии. Экологическая политика в регионах со средним и высоким доходом сосредоточена на местных проблемах.

**SSP5: «Развитие на базе ископаемых видов топлива (переход на магистраль)»**

Стремление к экономическому и социальному развитию сочетается с применением традиционных энергетических технологий на базе ископаемых видов топлива и принятием во всем мире ресурсоемкого и энергоемкого образа жизни. Конкурентные рынки и инновации способствуют быстрому технологическому прогрессу. Глобальные рынки становятся все более интегрированными. Также есть значительные инвестиции в здравоохранение и образование для увеличения человеческого и социального капитала. Все эти факторы приводят к быстрому росту мировой экономики, в то время как мировая численность населения в XXI веке достигает пика и начинает сокращаться. Успешно решаются местные экологические проблемы, такие как загрязнение воздуха.

Следует отметить, что при проведении климатических расчетов для Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) в связи с тем, что подготовка сценариев SSP еще не была завершена, использовались сценарии RCP отдельно, без связи с какими-либо путями социально-экономического развития. Индекс сценария соответствовал величине глобального антропогенного радиационного воздействия (РВ), достигаемого в 2100 г., а именно 2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м$^2$ – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно. Определение радиационного воздействия (the stratospherically adjusted radiative forcing) дано, в частности, в работе (Myhre et al., 2013). В дальнейшем для простоты об этих сценариях говорится как о сценариях RCP.

Для классификации сценариев в структуре SSP-RCP используются два индекса. Первый пока-

зывает номер пути социально-экономического развития (от 1 до 5), а второй – величину РВ, достигаемого в 2100 г., а именно 1,9; 2,6; 3,4; 4,5; 6,0; 7,0; 8,5 Вт/м$^2$. Например, в сценарии SSP5-8.5 рассматривается путь SSP5, а величина РВ составляет 8,5 Вт/м$^2$. Далее для простоты изложения об этих сценариях говорится как о сценариях SSP; при этом подразумевается, что второй индекс в обозначении сценария указывает на соответствующую траекторию RCP.

Сценарии создавались с помощью шести различных комплексных оценочных моделей. Для получения климатических характеристик все они использовали одну общую простую климатическую модель (Riahi et al., 2017). Результаты расчетов по комплексным оценочным моделям включают количественные оценки основных характеристик развития человечества, в частности, численности населения, скорости экономического роста, параметров энергетической системы и системы землепользования, а также величины эмиссий и концентраций парниковых газов и аэрозолей. При формировании каждого сценария выполнялись расчеты по нескольким комплексным оценочным моделям, однако чтобы облегчить дальнейшую работу с этими результатами, для каждого пути социально-экономического развития была выбрана одна модель и сценарии, полученные с помощью этой модели, получили название «выделенные сценарии» (marker scenarios). Именно из них в дальнейшем выбирались сценарии для расчетов с глобальными климатическими моделями.

Сценарии подразделяются на базовые, в которых развитие событий в будущем предполагает отсутствие новых возможностей по ослаблению антропогенных климатических воздействий, а также новых политических соглашений по вопросам климата, кроме тех, что действуют сейчас, и сценарии, в которых исследуются последствия политики ослабления климатических воздействий в применении к базовым сценариям. Как инструмент для возможного ослабления климатических воздействий используются предположения о совместной климатической политике, которые могут включать, в частности, ограничения или налогообложение эмиссий парниковых газов, а также политические соглашения, которые прямо касаются адаптации к климатическим изменениям, например, создание международного адаптационного фонда (Kriegler et al., 2014). Кроме того, предполагается применение технологий улавливания и хранения углерода при использовании ископаемого топлива, возможно, в сочетании с технологиями нетрадиционной возобновляемой энергетики, одно из центральных мест в которой принадлежит биоэнергетике, создаваемой на основе преобразования энергии биомассы и биоотходов (Riahi et al., 2017). Все это потенциально может приводить к отрицательным эмиссиям парниковых газов (рис. 1.1.2.3а).

Сценарные расчеты в международном проекте сравнения климатических моделей CMIP6 выполнялись в рамках подпроекта ScenarioMIP (O'Neill et al., 2016; Tebaldi et al., 2021). По приоритету выполнения экспериментов было выбрано две группы сценариев. К группе первого приоритета относятся сценарии SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5 и SSP1-2.6, а к группе второго – сценарии SSP4-6.0, SSP4-3.4, SSP5-3.4-OS и SSP1-1.9. Сокращение OS (overshot) в обозначении сценария SSP5-3.4-OS указывает на то, что в этом сценарии быстрый рост эмиссий парниковых газов (в данном случае до 2040 г.) сменяется в дальнейшем их быстрым падением (рис. 1.1.2.3а). Среди выбранных сценариев только два сценария SSP5-8.5 и SSP3-7.0 являются базовыми, а в остальных предполагаются какие-либо меры смягчения антропогенных климатических воздействий.

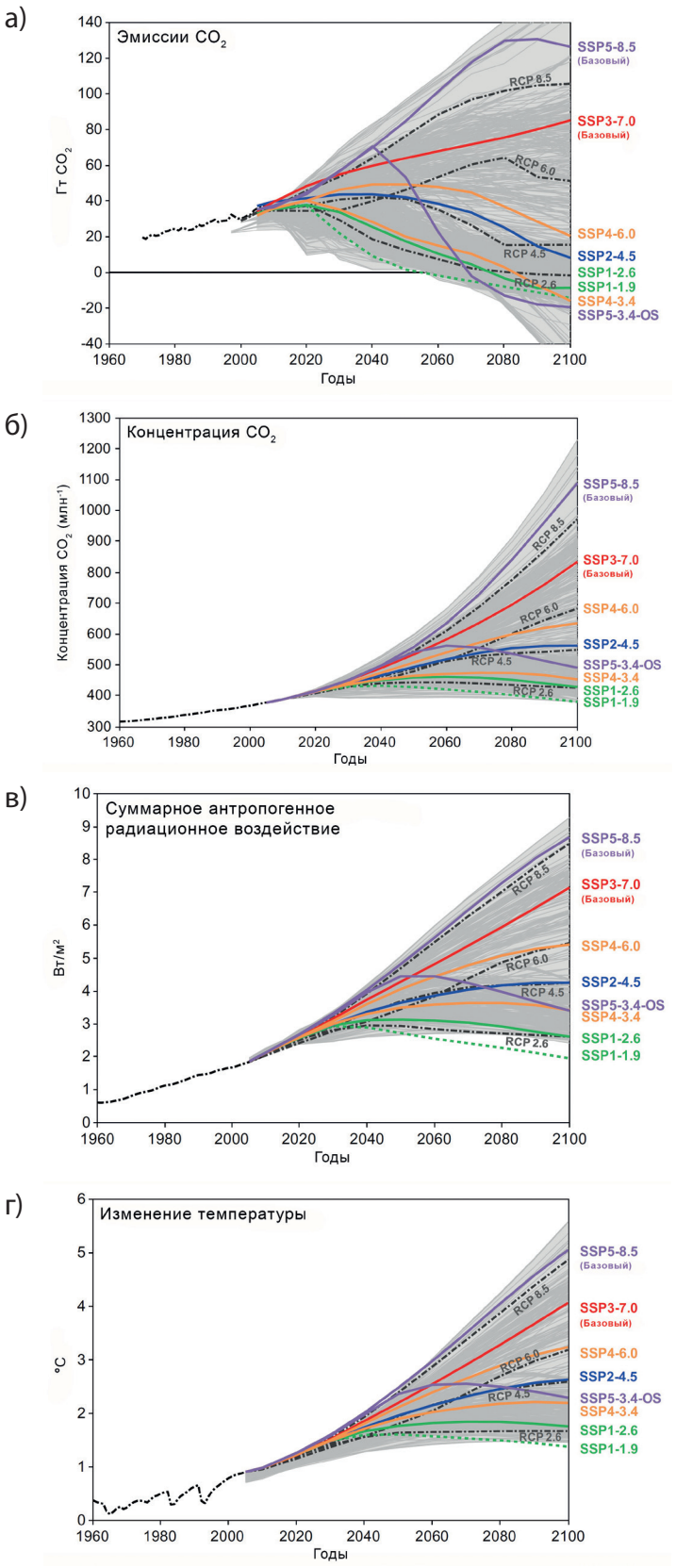



***Рис. 1.1.2.3*** *Сравнение сценариев SSP и RCP: эмиссии (а) и атмосферная концентрация (б) углекислого газа, антропогенное радиационное воздействие (в), изменения средней глобальной температуры приземного воздуха (г) со второй половины XX до конца XXI века по сценариям SSP и RCP (O'Neill et al., 2016)*

*Концентрация углекислого газа, радиационное воздействие и изменения температуры получены по расчетам с простой климатической моделью (Riahi et al., 2017).*

*Серые области – разброс по сценариям в сценарной базе Пятого оценочного доклада МГЭИК*

### 1.1.2.3 Сценарные прогнозы CMIP6[1]

**Температура приземного воздуха**

Изменения климата в XXI веке оцениваются по отношению к недавнему прошлому (1995-2014 гг.) и условно «доиндустриальному» периоду (1850-1900 гг.). Оценки будущих изменений температуры приземного воздуха, осадков на континентах и площади морского льда, выполненные с помощью моделей CMIP6 и представленные ниже, базируются на использовании тех же подходов к анализу, которые использовались в оценках изменений указанных характеристик моделей CMIP5 (Росгидромет, 2014). По ансамблевым расчетам для исторического и будущих периодов в XXI веке каждая модель CMIP6 представлена единственным расчетом. Будущие изменения получены как средние по ансамблю аномалии по отношению к историческому периоду в границах доверительного интервала 5-95%.

По оценкам CMIP5 и CMIP6, глобальная температура приземного воздуха будет повышаться в течение всего XXI века, если концентрация парниковых газов будет возрастать (рис. 1.1.2.4). Так, расчеты по CMIP6 показывают, что в период 2081-2100 гг. по сравнению с периодом 1995-2014 гг. потепление глобального климата попадает в диапазон 0,6-2,0 °C при реализации сценария SSP1-2.6. Диапазон изменения температуры для агрессивного сценария эмиссии (SSP5-8.5) существенно больший (2,7-5,7 °C). Диапазоны изменений для промежуточных сценариев SSP2-4.5 и SSP3-7.0 включают умеренный рост температуры (соответственно, 1,4-3,0 °C и 2,2-4,7 °C). При реализации сценария SSP1-1.9 (с низкой эмиссией парниковых газов) прогнозируется рост глобальной температуры в диапазоне 0,2-1,3 °C. Оценки потепления для всех сценариев имеют высокую степень достоверности.

Из результатов модельных расчетов следует, что глобальные изменения температуры превысят пороговые значения 1,5 °C относительно «доиндустриального» периода 1850-1900 гг. при реализации сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 в среднем около 2030 года; 2,0 °C при реализации сценариев SSP3-7.0 или SSP5-8.5 – около 2043 года и 3,0 °C при реализации сценария SSP5-8.5 – около 2062 года. При реализации сценария SSP1-1.9 результаты только 55 и 36% моделей превысят, соответственно, пороговые значения потепления 1,5 °C и 2,0 °C, а при реализации сценария SSP1-2.6 эти доли увеличатся, соответственно, до 87 и 58%.

В соответствии с более ранними оценками, модели CMIP6 указывают на повышение температуры на суше, примерно на 50% большее по сравнению с океанами. Потепление в Арктике прогнозируется большим глобального, более чем в 2,5 раза.

Потепление к концу XXI века на континентах прогнозируется в диапазонах 0,3-2,0 °C и 3,5-7,6 °C при реализации сценариев SSP1-1.9 и SSP5-8.5. Соответствующие диапазоны изменения температуры в Арктике составляют 0,5-6,6 °C и 6,2-15,2 °C. Все оценки будущих изменений температуры основаны на предположении, что в ближайшие десятилетия не будут происходить крупные вулканические извержения.

[1] Материал, изложенный ниже, опирается на сценарные прогнозы изменений глобального климата в XXI веке, представленные в Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021). Приводимые оценки достоверности результатов соответствуют системе, принятой МГЭИК (Mastrandrea et al., 2011).

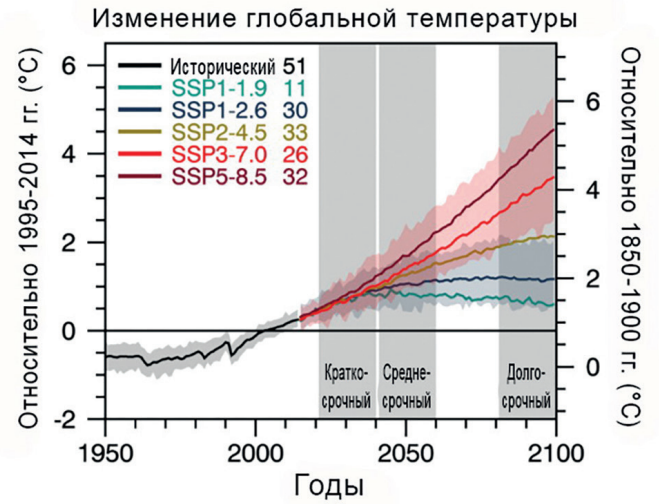



***Рис. 1.1.2.4*** *Отклонение годовой глобальной температуры приземного воздуха от средней за 1995-2014 гг. (ось слева) и за 1850-1900 гг. (ось справа)*

*На рисунке показаны отклонения от средних, полученные в расчетах моделей CMIP6; заштрихованные области по обе стороны кривых SSP1-2.6 и SSP3-7.0 – процентили доверительного интервала от 5 до 95%; в левом верхнем углу рисунка – число моделей в расчетах; вертикальные серые полосы соответствуют краткосрочному, среднесрочному и долгосрочному сценарному прогнозу (IPCC, 2021)*

Модели CMIP6 демонстрируют общую тенденцию к большему среднему глобальному потеплению к концу XXI века, чем модели CMIP5, для номинально сопоставимых сценариев (очень высокая степень достоверности). В SSP1-2.6 и SSP2-4.5 диапазоны 5-95% остались такими же, как диапазоны в RCP2.6 и RCP4.5 соответственно, но распределения сместились вверх примерно на 0,3 °C (высокая степень достоверности). Для SSP5-8.5 по сравнению с RCP8.5 5%-ная граница распределения почти не изменилась, но граница 95% и диапазон расширились примерно на 20 и 40% соответственно (высокая степень достоверности). Около половины вклада в больший рост температуры обеспечивает более высокая чувствительность равновесного климата в целом ряде моделей ансамбля CMIP6 по сравнению с ансамблем CMIP5. Остальной вклад вносит эффект радиационного воздействия, который при номинально сравнимых сценариях оказывается большим при использовании сценариев последнего поколения (например, для сценария SSP5-8.5 по сравнению с RCP8.5 (средняя степень достоверности)).

Весьма вероятно, что среднее глобальное понижение температуры в стратосфере будет большим для сценариев с более высокими концентрациями $CO_2$ в атмосфере. Вероятно, что потепление в верхней тропосфере тропиков будет большим, чем у поверхности, однако величина этого потепления оценена недостаточно точно вследствие естественной изменчивости и неопределенности реакции климатической системы на антропогенное воздействие.

**Осадки**

Сценарные прогнозы CMIP5 указывают на будущий рост средних глобальных осадков в XXI веке относительно осадков по данным наблюдений более чем на 0,05 мм/сут. (примерно на 2%) и на 0,15 мм/сут. (около 5%) к концу XXI века, соответственно, для сценариев RCP2.6

и RCP8.5 (Collins et al., 2013). При анализе сценарных прогнозов CMIP6 основное внимание уделяется осадкам на суше, поскольку они имеют наибольшую социальную значимость. Как и в случае с температурой воздуха, в анализе ансамблевого сценарного прогноза изменений количества осадков используется по одной реализации каждой модели CMIP6 для каждого из пяти сценариев. Изменения рассчитываются в процентах по отношению к количеству осадков за период 1995-2014 гг. (рис. 1.1.2.5).

Количество глобальных осадков на суше оказывается больше для периода 2081-2100 гг., чем для периода 1995-2014 гг., для всех рассмотренных сценариев (высокая степень достоверности). Доверительные интервалы 5-95-процентных изменений количества осадков к концу XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. с высокой степенью достоверности следующие: –0,2-4,7% (сценарий SSP1-1.9), 0,0-6,6% (SSP1-2.6), 1,5-8,3% (SSP2-4.5), 0,5-9,6% (SSP3-7.0) и 0,9-12,9% (SSP5-8.5).

***Рис. 1.1.2.5*** *Отклонение годового количества осадков на суше от среднего за период 1995-2014 гг. На рисунке показаны отклонения от средних, полученные в расчетах моделей CMIP6; заштрихованные области по обе стороны кривых SSP1-2.6 и SSP3-7.0 – процентили доверительного интервала от 5 до 95% (цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 1.1.2.4); в верхней части рисунка – число моделей в расчетах; вертикальные серые полосы соответствуют краткосрочному, среднесрочному и долгосрочному сценарному прогнозу (IPCC, 2021)*

Модельные расчеты для сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 при пороговом значении роста глобальной температуры приземного воздуха 1,5 °C по сравнению с периодом 1850-1900 гг. показывают, что средние по ансамблю изменения количества глобальных осадков на суше могут составить 1,6%. При глобальном потеплении на 2,0 °C по сценариям SSP3-7.0 и SSP5-8.5 и 3,0 °C по сценарию SSP5-8.5 увеличение глобальных осадков на суше составит, соответственно, 2,6 и 4,9% относительно базового периода. Для сценариев SSP1-1.9 и SSP1-2.6 и потеплении, превышающем 1,5 °C и 2,0 °C, изменения количества глобальных осадков на суше прогнозируются, соответственно, на 1,9 и 3,0%.

Модели CMIP6 для всех сценариев прогнозируют больший относительный рост осадков на суше, чем глобальных или над океанами, по отношению к периоду 1995-2014 гг.

Пространственные распределения изменений количества осадков демонстрируют существенные региональные различия и сезонные контрасты. По мере того как потепление глобального климата усиливается, на континентах увеличиваются области со статистически значимым ростом или сокращением количества осадков (средняя степень достоверности).

Количество осадков, весьма вероятно, увеличится в высоких широтах и над океанами в тропиках и, вероятно, в большинстве муссонных регионов, но, вероятно, уменьшится в значительной части субтропиков в результате потепления, вызванного парниковыми газами. Межгодовая изменчивость количества осадков во многих континентальных регионах увеличится с ростом глобальной температуры (средняя степень достоверности).

Изменения количества осадков в краткосрочной перспективе имеют низкую предсказуемость в основном вследствие их большой естественной изменчивости и неопределенностей, связанных с естественным и антропогенным аэрозольными воздействиями (средняя степень достоверности). В период 2021-2040 гг. не прогнозируются заметные различия в изменении количества осадков между сценариями (высокая степень достоверности). Аэрозольное антропогенное воздействие уменьшается в большинстве сценариев, способствуя росту средней глобальной температуры приземного воздуха (средняя степень достоверности) и среднего глобального количества осадков на суше (низкая степень достоверности). Исследования, выполненные с использованием данных наблюдений и модельных расчетов, показывают, что обычно извержения вулканов на несколько лет приводят к уменьшению количества осадков на континентах, повышению засушливости во влажных и росту увлажнения в засушливых регионах (средняя степень достоверности).

Вероятно, что муссонные осадки на континентах в целом увеличатся, особенно в северном полушарии, однако муссонная циркуляция северного полушария по оценкам CMIP6 в будущем может ослабеть. Прогнозируется усиление Азиатско-Африканских муссонов и некоторое ослабление муссона Северной Америки (средняя степень достоверности).

**Снежный покров суши**

В Пятом оценочном докладе МГЭИК (Collins et al., 2013) отмечено, что для жестких сценариев выбросов в конце XXI века можно ожидать существенного уменьшения весеннего снежного покрова в северном полушарии (высокая степень достоверности), пространственное же распределение изменений годового максимума водного эквивалента снежного покрова прогнозируется с умеренной степенью достоверности. Основываясь на исследованиях с использованием регионализации модельных расчетов CMIP5 или региональных климатических моделей, как напрямую, так и с помощью моделей снежного покрова, использующих такие данные в качестве входных, в специальном докладе МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата сделан вывод о вероятном уменьшении высоты или массы снега на небольших высотах многих горных хребтов в течение XXI века и с очень высокой степенью достоверности – о меньших их изменениях на больших высотах (Hock et al., 2019).

Для всех сценариев выбросов и с незначительной зависимостью от сценария модели CMIP6 устойчиво (все модели и во все месяцы) демонстрируют уменьшение снежного покрова в северном полушарии при росте глобальной температуры приземного воздуха в XXI веке (Mudryk et al., 2020). Уменьшение площади снежного покрова, полученное в модельных расчетах для XXI века,

практически линейно зависит от роста глобальной температуры для всех месяцев, за исключением времени полного исчезновения снежного покрова, происходящего при изменении глобальной температуры приземного воздуха примерно на + 2 °C выше уровня 1995-2014 гг. (то есть примерно на +3 °C выше доиндустриального уровня) в июле и августе, и примерно на +3 °C выше уровня 1995-2014 гг. в июне и сентябре.

В Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021) делается вывод, что в целом непротиворечивые прогнозы всех поколений глобальных климатических моделей, понимание основных физических процессов и тесная связь между снежным покровом и температурой на различных временных масштабах дают практически полную уверенность в том, что в будущем протяженность снежного покрова и продолжительность его залегания в северном полушарии сохранят тенденцию к уменьшению по мере потепления глобального климата. Несмотря на то что большинство исследований были выполнены для северного полушария, понимание процесса позволяет предположить, что эти результаты применимы также и к южному полушарию (высокая степень достоверности).

**Многолетняя мерзлота**

В Пятом оценочном докладе МГЭИК (Collins et al., 2013) и Специальном докладе МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата (Meredith et al., 2019) на основании имеющихся данных модельных расчетов CMIP5 сделан вывод о том, что с высокой степенью достоверности в будущем под воздействием глобального потепления глубина протаивания многолетней мерзлоты будет увеличиваться, а протяженность приповерхностной многолетней мерзлоты – уменьшаться, однако величина будущих изменений оценивается с умеренной степенью достоверности из-за имеющихся недостатков моделей и большого межмодельного разброса результатов. В течение XXI века (с очень высокой степенью достоверности) таяние и деградация многолетней мерзлоты в высокогорных регионах будут усиливаться, наиболее серьезные последствия прогнозируются для сценариев высоких выбросов парниковых газов (Hock et al., 2019). Недавно опубликованные исследования (например, Zhao et al., 2019) подтверждают эти оценки.

Использование модельных результатов CMIP5 и установленных связей между наблюдаемым современным пространственным распределением многолетней мерзлоты и среднегодовой температурой воздуха позволило рассчитать потерю площади многолетней мерзлоты при потеплении как функцию величины среднего глобального потепления. Равновесная чувствительность сокращения площади многолетней мерзлоты к среднему глобальному потеплению составила 4 млн км$^2$/°C (IPCC, 2021). Для сценария стабилизации глобального потепления на уровне 1,5 °C будет потеряно примерно 4,8 ± 2,1 млн км$^2$ площади многолетней мерзлоты по сравнению с уровнем 1960-1990 гг., а при стабилизации потепления на уровне 2 °C потери составят около 6,6 ± 2,1 млн км$^2$ (Chadburn et al., 2017). Предыдущие оценки чувствительности многолетней мерзлоты, как правило, давались с точки зрения потепления в высоких широтах, а не глобального потепления, и, по данным анализа модельных результатов CMIP5, полученные значения эквивалентны 3,3 ± 1,2 млн км$^2$/°C (Koven et al., 2013).

Результаты расчетов климата XXI века моделями CMIP6 согласованно указывают на чувствительность объема многолетнемерзлого грунта в верхнем трехметровом слое к температуре. В работе (Burke et al., 2020) с использованием данных CMIP5 и CMIP6 установлено, что чувствитель-

ность многолетней мерзлоты – изменение объема мерзлого грунта на градус изменения средней глобальной температуры воздуха – составляет 25 ± 5%/°C относительно среднего значения объема за 1995-2014 гг. и изменения температуры до +4 °C по отношению к доиндустриальному уровню (умеренная степень достоверности).

На основе высокой согласованности модельных расчетов CMIP6 и более ранних моделей, понимания фундаментальных процессов и палеоклиматических данных практически очевидно, что площадь и объем многолетней мерзлоты будут сокращаться по мере потепления глобального климата.

**Морской ледяной покров в Арктике**

Оценки моделей CMIP5 показали, что к концу этого столетия площадь морского льда в Северном Ледовитом океане уменьшится во все месяцы года (Collins et al., 2013). Это уменьшение составит от 43 до 94% для сценариев RCP2.6 и RCP8.5 в сентябре и от 8 до 34% в марте, соответственно (средняя степень достоверности). На основе пяти выбранных моделей CMIP5 было установлено, что для сценария RCP8.5 Арктика станет практически свободной ото льда (сентябрьская площадь ледяного покрова в Арктике не будет превосходить 1 млн км$^2$) между 2040 и 2060 гг.

На основании расчетов моделей CMIP6 можно заключить, что в среднем Арктика станет практически свободной от льда в сентябре в конце XXI века при реализации сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (рис. 1.1.2.6) (высокая степень достоверности). Согласно моделям CMIP6, площадь морского льда в марте будет уменьшаться, но в гораздо меньшей (в процентном отношении) степени, чем в сентябре (высокая степень достоверности).

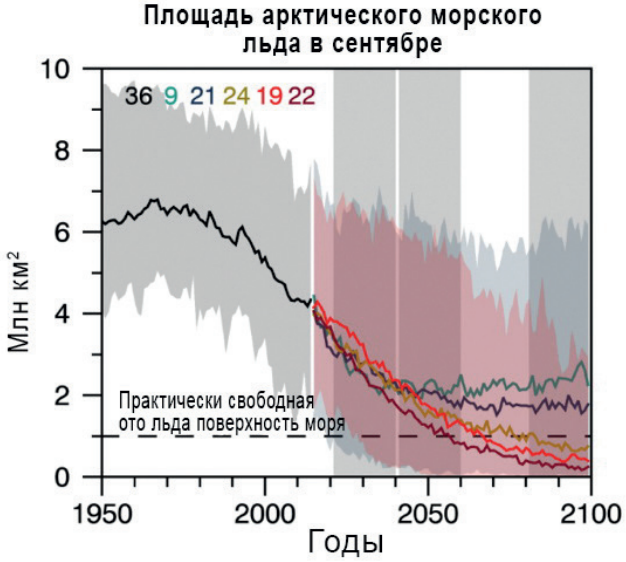



***Рис. 1.1.2.6*** *Изменение площади арктического морского льда в сентябре*

*На рисунке показаны средние, полученные в расчетах моделей CMIP6; заштрихованные области по обе стороны кривых SSP1-2.6 и SSP3-7.0 – процентили доверительного интервала от 5 до 95% (цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 1.1.2.4); числа наверху рисунков – количество моделей в расчетах; вертикальные серые полосы соответствуют краткосрочному, среднесрочному и долгосрочному сценарному прогнозу (IPCC, 2021)*

**Уровень Мирового океана**

Оценки моделей CMIP5 показывают, что существует высокая вероятность, что скорость роста глобального среднего уровня Мирового океана в XXI веке превысит наблюдаемую скорость роста в период 1971-2010 гг. для всех сценариев RCP в результате потепления океана и сокращения массы ледников и ледяных щитов (Church et al., 2013). Более того, модели CMIP5 показывают, что за период 2081-2100 гг. по сравнению с 1986-2005 гг. вероятное повышение глобального среднего уровня океана (5-95%-й диапазон модельных расчетов) составит 0,26-0,55 м, 0,32-0,63 м, 0,33-0,63 м и 0,45-0,82 м для сценариев RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 соответственно.

Согласно более поздним модельным оценкам, для сценария SSP3-7.0 изменение уровня Мирового океана в 2081-2100 гг. относительно периода 1995-2014 гг., вероятно, составит 0,46-0,74 м, а для сценария SSP1-2.6 вероятные изменения глобального уровня Мирового океана находятся в интервале 0,30-0,54 м. При оценке изменений глобального уровня Мирового океана вклад таяния льда на континентах добавлялся автономно к рассчитанным значениям уровня за счет термического расширения в моделях CMIP6. В целом, практически не вызывает сомнений, что для любого из рассмотренных сценариев повышение глобального уровня Мирового океана будет продолжаться в течение всего XXI века. Кроме того, для сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 прогнозируется ускорение роста глобального уровня Мирового океана в XXI веке (рис. 1.1.2.7).

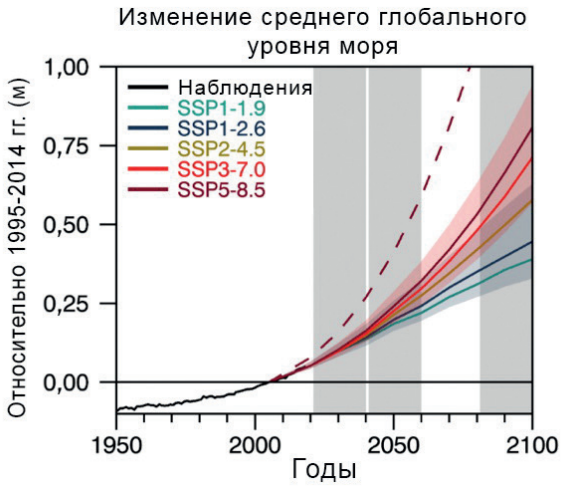



***Рис. 1.1.2.7*** *Отклонение глобального уровня Мирового океана от среднего за период 1995-2014 гг. На рисунке показаны отклонения от среднего, полученные в расчетах по моделям CMIP6; заштрихованные области по обе стороны кривых SSP1-2.6 и SSP3-7.0 – процентили доверительного интервала от 5 до 95%; вертикальные серые полосы соответствуют краткосрочному, среднесрочному и долгосрочному сценарному прогнозу*

*Представленные сценарные прогнозы учитывают вклад полученного непосредственно в модельных расчетах CMIP6 термического расширения воды Мирового океана, а также вклад таяния льда на суше, рассчитанного отдельно.*

*Прерывистая кривая показывает маловероятный результат реализации сценария SSP5-8.5 – верхнюю границу межмодельного разброса, достигающую 1,7 м повышения глобального уровня Мирового океана к 2100 г. (по отношению к 1995-2014 гг.) и отражающую большие неопределенности в оценках неустойчивости ледниковых щитов (IPCC, 2021)*

## Экстремальность климата

### *Экстремальность термического режима*

Согласно выводам, приведенным в Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021), в будущем с очень высокой степенью достоверности будут чаще наблюдаться экстремально высокие температуры и реже – экстремально низкие (как в глобальном масштабе, так и на большей части суши). С высокой степенью достоверности волны тепла будут возникать с большей частотой и будут иметь большую продолжительность по сравнению с предыдущими десятилетиями, а частота и продолжительность волн холода будут сокращаться. Недавно была представлена оценка прогнозируемых изменений повторяемости экстремально высоких температур при глобальном потеплении на 1,5 °C, по сравнению с потеплением на 2 °C (IPCC, 2018). Из сравнения следует, что с умеренной степенью достоверности глобальное потепление на 2 °C приведет к существенно большей повторяемости экстремально высоких температур на суше, а также к более длительным периодам с такими температурами во многих регионах с высокой плотностью населения. Отмечается, что с высокой степенью достоверности больший рост продолжительности таких периодов ожидается для более редких событий. В то же время экстремальные явления, обусловленные низкими температурами воздуха, станут менее интенсивными и продолжительными. Согласно сценарным прогнозам, выполненным в рамках CMIP5 и CMIP6 на период 2006-2100 гг., наиболее заметно экстремально высокие температуры могут вырасти на суше умеренных широт; прогнозируемый рост температуры наиболее теплых дней в этих широтах существенно превысит ожидаемое изменение средней глобальной температуры (Fischer et al., 2014; Seneviratne et al., 2016). На всех континентах северного полушария экстремальные погодные явления летом чаще будут наблюдаться как непрерывные периоды жарких дней и ночей при сокращении интервалов между ними (Wang et al., 2020). Несмотря на квазилинейную зависимость изменения экстремальных температур от величины глобального потепления, повторяемость превышения различных пороговых значений вырастет неодинаково. Например, согласно прогнозным оценкам, экстремальные температуры с повторяемостью один раз в 20 лет будут отмечаться на 80% чаще при глобальном потеплении на 1,5 °C и на 180% чаще при потеплении на 2 °C. Повторяемость случаев один раз в 100 лет вырастет при указанных повышениях температуры, соответственно, на 200% и более чем на 700% (Kharin et al., 2018).

### *Экстремальные осадки*

В Пятом оценочном докладе МГЭИК (Collins et al., 2013) отмечается, что с очень высокой степенью достоверности экстремальные осадки на протяжении XXI века на большей части суши умеренных широт и влажных тропиков будут все более частыми и интенсивными. Все последующие исследования с использованием сценарных прогнозов по глобальным и региональным моделям подтверждают эти оценки.

Модельные расчеты также показывают, что будущие изменения годовых максимумов суточных сумм осадков слабо зависят от сценария радиационного воздействия (Pendergrass et al., 2015; Sillmann et al., 2017). Изменения вероятности выпадения экстремальных осадков, соответствующих процентилям 99 и 99,9% их статистических распределений, за исторический период сопоставимы по величине с различиями в прогнозируемых изменениях между сценариями глобального потепления на 1,5 °C и 2 °C (Fischer, Knutti, 2015). Несмотря на то что

количественные оценки будущих изменений экстремальных осадков несколько различаются в зависимости от величины потепления, качественная картина прогнозируемых изменений оказывается близкой и слабо зависит от роста глобальной температуры. Особенности изменений экстремальных осадков в целом аналогичны тем, которые прогнозируются для средних сезонных осадков: это увеличение в большинстве регионов (за исключением некоторых субтропических районов). Однако в будущем рост экстремальных осадков возможен и там, где прогнозируется уменьшение среднего количества осадков (Dai et al., 2018). В глобальном масштабе увеличение интенсивных и экстремальных осадков, как правило, будет соответствовать скорости увеличения максимального количества влаги, которое атмосфера может аккумулировать при потеплении (с высокой степенью достоверности это увеличение находится в диапазоне 6-7% при повышении глобальной температуры на 1 °C).

Как и в случае экстремальных температур, рост экстремальных осадков будет линейно зависеть от роста глобальной температуры, однако изменения повторяемости их выпадения будут происходить по-разному, причем больший рост ожидается для более редких событий. Например, при глобальном потеплении на 1,5 °C (2 °C) увеличение повторяемости экстремальных осадков с частотой один случай за 20 лет составит 10% (22%). Для осадков с повторяемостью один случай за 100 лет для указанных значений глобального потепления возможен рост, соответственно, на 20% и более чем на 45% (Kharin et al., 2018).

***Наводнения***

В докладе МГЭИК (IPCC, 2012) отмечен недостаток исследований, посвященных анализу механизмов формирования наводнений при реализации различных сценариев внешних воздействий, и сделан вывод о низкой степени достоверности сценарных прогнозов наводнений. Большинство недавних исследований, которые включают прогнозные оценки наводнений на основе расчетов климатических и гидрологических моделей, весьма ограничены и обычно не затрагивают аспекты, связанные со степенью опасности наводнений и наносимым ущербом, мерами по предотвращению наводнений и стратегиями борьбы с ними (Neumann et al., 2015; Barraqué, 2017).

В Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021) делается вывод в отношении характера будущих изменений катастрофических наводнений, включающий прогноз их роста более чем на половине территории суши земного шара (части Южной и Юго-Восточной Азии, тропической Африки, северо-востока Евразии и Южной Америки) и уменьшения повторяемости таких наводнений в других частях мира (умеренная степень достоверности). В докладе МГЭИК (IPCC, 2018) отмечается, что с умеренной степенью достоверности глобальное потепление на 2 °C приведет (вследствие роста интенсивных осадков) к увеличению в глобальном масштабе доли территории, подверженной рискам наводнений, по сравнению с условиями, которые могут сформироваться при глобальном потеплении на 1,5 °C. Результаты сценарных прогнозов, выполненные с привлечением региональных атмосферных и гидрологических моделей высокого разрешения, указывают на последовательное увеличение в будущем повторяемости высоких паводков при глобальном потеплении на 1,5 °C, 2 °C и 4 °C во всех регионах, кроме Европы (Alfieri et al., 2017; Paltan et al., 2018).

***Засухи***

В Пятом и Шестом оценочных докладах МГЭИК (IPCC, 2012; 2021) подчеркивается умеренная степень достоверности прогнозов увеличения суровости засух в некоторых регионах, включая Южную Европу и Средиземноморье, Центральную Европу, Центральную Америку и Мексику, северо-восток Бразилии и юг Африки. Отмечается низкая степень достоверности сценарных прогнозов засух в других регионах из-за большого межмодельного разброса и неопределенности локальных механизмов формирования засух. Кроме того, в неопределенность прогнозных оценок вносят вклад и различия в определениях засух, которые могут включать разные статистические интерпретации и критерии временных масштабов засух и их интенсивности (Vicente-Serrano et al., 2020), а также физиологические реакции растений на рост температуры и концентрации $CO_2$ в атмосфере (Greve et al., 2019). Согласно оценкам CMIP6, которые согласуются с результатами модельных оценок предыдущего поколения (CMIP5), вероятность возникновения засухи значительно возрастает при росте глобального потепления от 1,5 °C до 2 °C (IPCC, 2018; Xu et al., 2019). В будущем с высокой степенью достоверности при усилении глобального потепления испарение с поверхности суши будет продолжать расти, что повлечет высыхание почвы. Прогнозы, основанные на оценках изменений дефицита влаги в почве, указывают на более сильный в будущем рост пространственных масштабов и интенсивности засух, по сравнению с прогнозами, основанными только на изменении дефицита осадков (умеренная степень достоверности).

***Экстремальные циклоны***

Экстремальные циклоны – это барические системы с давлением в центре ниже 980 гПа, сопровождающиеся опасными и экстремальными ветровым, термическим и гидрологическим режимами у подстилающей поверхности. Такие циклоны образуются преимущественно над водной поверхностью от тропиков до высоких широт. Количественная оценка воздействия изменения климата на экстремальные циклоны затруднена вследствие их редкой повторяемости, малого времени жизни и ограниченных размеров. Большая естественная изменчивость атмосферы обусловливает существенно более высокую неопределенность оценок будущих изменений в статистике таких явлений по сравнению с оценками изменений других характеристик климата, например, крупномасштабных тенденций изменения температуры у подстилающей поверхности или осадков.

В настоящее время не существует устойчивых представлений о механизме будущих изменений повторяемости тропических циклонов (ТЦ). Большинство, но не все (Bhatia et al., 2018; Vecchi et al., 2019) глобальные климатические модели сравнительно высокого пространственного разрешения (шаг сетки менее 100 км) прогнозируют в целом значительное сокращение общего числа ТЦ в XXI веке (Knutson et al., 2020). Средний максимум скорости ветра в ТЦ и число ТЦ категорий 4 и 5 (со скоростями ветра, соответственно, 58-70 м/с и свыше 70 м/с), скорее всего, будут расти при дальнейшем потеплении климата. Вероятно, что повторяемость ТЦ указанных категорий увеличится в ограниченных регионах северо-западной части Тихого океана. С ростом глобальной температуры средняя интенсивность связанных с ТЦ осадков в XXI веке будет возрастать (умеренная степень достоверности).

Как отмечается в Пятом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2013), повторяемость внетропических циклонов в будущем уменьшится,

но не более, чем на несколько процентов относительно их числа в начале XXI века. Уменьшение возможно преимущественно в экваториальном секторе циклонических траекторий, что связано с расширением ячейки Хэдли и сдвигом к полюсу при потеплении средней широты зарождения внетропических циклонов и их траекторий (Tamarin-Brodsky, Kaspi, 2017). Ожидается, что изменения повторяемости экстремальных внетропических циклонов будут аналогичны тем, которые прогнозируются для внетропических циклонов в целом. Как следует из ранее проведенных исследований (Christensen et al., 2013; Yettella, Kay, 2017), изменения динамических характеристик экстремальных внетропических циклонов (например, скорости ветра) будут незначительными. С высокой степенью достоверности можно утверждать, что средняя и максимальная интенсивность осадков, связанных с экстремальными внетропическими циклонами, будет возрастать, преимущественно вследствие увеличения содержания водяного пара в атмосфере на фоне роста глобальной температуры.

## Список литературы


**Катцов В. М., Говоркова В. А., 2013:** Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. – Вып. 569. – С. 76-98.

**Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2022:** Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды ГГО. – Вып. 604. – С. 5-54.

**Мелешко В. П., Говоркова В. А., 2013:** Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей CMIP3 и CMIP5 // Труды ГГО. – Вып. 568. – С. 26-50.

**Павлова Т. В., Катцов В. М., 2013:** Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // Труды ГГО. – Вып. 568. – С. 7-25.

**Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., 2014:** Новое поколение климатических моделей / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (В. М. Катцов, С. М. Семенов, ред.). – М.: Росгидромет, 2014. – С. 286-320.

**Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013:** Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений // Труды ГГО. – Вып. 569. – С. 38-61.

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (А. И. Бедрицкий и др., ред.). – М.: Росгидромет, т. 1 (230 с.) и т. 2 (291 с.).

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (В. М. Катцов, С. М. Семенов, ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013:** Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий // Труды ГГО. – Вып. 568. – С. 51-79.

**Abramowitz G., Herger N., Gutmann E., Hammerling D., Knutti R., Leduc M., Lorenz R., Pincus R., Schmidt G. A., 2019:** ESD Reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: weighting, sub-selection and out-of-sample testing // Earth System Dynamics, v. 10, pp. 91-105. https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019

**Alfieri L., Bisselink B., Dottori F., Naumann G., de Roo A., Salamon P., Wyser K., Feyen L., 2017:** Global projections of river flood risk in a warmer world // Earth's Future, v. 5, pp. 171-182. https://doi.org/10.1002/2016EF000485

**Barraqué B., 2017:** The common property issue in flood control through land use in France // Journal of Flood Risk Management, v. 10, pp. 182-194. doi:10.1111/jfr3.12092.

**Bhatia K., Vecchi G., Murakami H., Underwood S., Kossin J., 2018:** Projected response of tropical cyclone intensity and intensification in a global climate model // Journal of Climate, v. 31, pp. 8281-8303. doi:10.1175/JCLI-D-17-0898.1.

**Burke E., Zhang Y., Krinner G., 2020:** Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change // Cryosphere, v. 14, pp. 3155-3174. doi:10.5194/tc-14-24 3155-2020.

**Chadburn S. E., Burke E. J., Cox P. M., Friedlingstein P., Hugelius G., Westermann S., 2017:** An observation based constraint on permafrost loss as a function of global warming // Nature Climate Change, v. 7, pp. 340-344. doi:10.1038/nclimate3262.

**Christensen J. H., Krishna-Kumar K., Aldrian E., An S.-I., Cavalcanti I. F. A., de Castro M., Dong W., Goswami P., Hall A., Kanyanga J. K., Kitoh A., Kossin J., Lau N.-C., Renwick J., Stephenson D. B., Xie S.-P., Zhou T., 2013:** Climate Phenomena and Their Relevance for Future Regional Climate Change. In: Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P. M., Eds., Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change –Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1217-1308.

**Church J. A., Clark P. U., Cazenave A., Gregory J. M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M. A., Milne G. A., Nerem R. S., Nunn P. D., Payne A. J., Pfeffer W. T., Stammer D., Unnikrishnan A. S., 2013:** Sea

Level Change. Pages 1137-1216, In: 'Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. (Eds T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley) – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi:10.1017/CB09781107415315.026.

**Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W. J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A. J., Wehner M., 2013:** Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1029-1136, doi:10.1017/CBO9781107415324.024.

**CRU-4, 2020: Harris I., Osborn T. J., Jones P. et al., 2020:** Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data, v. 7, p. 109. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3

**Dai A., Zhao T., Chen, J., 2018:** Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective // Current Climate Change Reports, v. 4, pp. 301-312. doi:10.1007/s40641-018-0101-6.

**ERA-5, 2020:** Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., 2020: The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 46, pp. 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

**Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2016:** Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development, v. 9, pp. 1937-1958, https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016.

**Eyring V., Gillett N. P., Achuta Rao K. M., Barimalala R., Barreiro Parrillo M., Bellouin N., Cassou C., Durack P. J., Kosaka Y., McGregor S., Min S., Morgenstern O., Sun Y., 2021:** Human Influence on the Climate System. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)] – Cambridge University Press. In Press.

**Fischer E. M., Knutti R., 2015:** Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high temperature extremes // Nature Climate Change, v. 5, pp. 560-564. doi:10.1038/nclimate2617.

**Fischer E. M., Sedláček J., Hawkins E., Knutti R., 2014:** Models agree on forced response pattern of precipitation and temperature extremes // Geophysical Research Letters, v. 41, pp. 8554-8562. doi:10.1002/2014GL062018.

**Greve P., Roderick M. L., Ukkola A. M., Wada Y., 2019:** The aridity Index under global warming // Environmental Research Letters, v. 14, 124006. doi:10.1088/1748-9326/ab5046.

**Hawkins E., Sutton R., 2009:** The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions // Bulletin of American Meteorological Society, v. 90, pp. 1095-1108. doi:10.1175/2009BAMS2607.1

**Herger N., Abramowitz G., Knutti R., Angélil O., Lehmann K., Sanderson B. M., 2018:** Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties // Earth System Dynamics, v. 9, pp. 135-151.

**Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M., Kääb A., Kang S., Kutuzov S., Milner A., Molau U., Morin S., Orlove B., Steltzer H., 2019:** High Mountain Areas / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)] – pp. 131-202.

**IPCC, 2012:** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582 pp.

**IPCC, 2013: Climate Change 2013:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen,

J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

**IPCC, 2018:** Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds)] – IPCC Secretariat, pp. 175-311. Available at: https://www.ipcc.ch/sr15

**IPCC, 2021:** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

**Kharin V. V., Flato G. M., Zhang X., Gillett N. P., Zwiers F., Anderson K. J., 2018:** Risks from Climate Extremes Change Differently from 1.5 °C to 2.0 °C Depending on Rarity // Earth's Future, v. 6, pp. 704-715. doi:10.1002/2018EF000813.

**Knutson T., Camargo S. J., Chan J. C. L., Emanuel K., Ho C.-H., Kossin J., Mohapatra M., Satoh M., Sugi M., Walsh K., Wu L., 2020:** Tropical cyclones and climate change assessment: part II: projected response to anthropogenic warming // Bulletin of American Meteorological Society, v. 101, pp. E303–E322. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1.

**Knutti R., Sedláček J., Sanderson B. M., Lorenz R., Fischer E. M., Eyring V., 2017:** A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence // Geophysical Research Letters, v. 44, pp. 1909-1918. doi:10.1002/2016GL072012.

**Koven C. D., Riley W. J., Stern A., 2013:** Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models – Journal of Climate, v. 26, pp. 1877-1900.

**Kriegler E., Edmonds J., Hallegatte S., Ebi K., Kram T., Riahi K., Winkler H., van Vuuren D., 2014:** A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions // Climatic Change, v. 122, pp. 401-414.

**Lee J. Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., Zhou T., 2021:** Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553-672, doi:10.1017/9781009157896.006.

**Mastrandrea M. D., Mach K. J., Plattner G-K., Edenhofer O., Stocker T. F., Field C. B., Ebi K. L., Matschosset P. R., 2011:** The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: A common approach across the working groups // Climatic Change, v. 108, pp. 675-691.

**Meehl G. A., Senior C. A., Eyring V., Flato G., Lamarque J.-F., Stouffer R. J., Taylor K., Schlund M., 2020:** Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models // Science Advances, v. 6, eaba1981. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1981.

**Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M. M. C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E. A. G., 2019:** Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 203-320. https://doi.org/10.1017/9781009157964.005.

**Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J.,**

**Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J., 2010:** The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature, v. 463, pp. 747-756.

**Mudryk L., Santolaria-Otín M., Krinner G., Ménégoz M., Derksen C., Brutel-Vuilmet C., Brady M., Essery R., 2020:** Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble // The Cryosphere, v. 14, pp. 2495-2514, https://doi.org/10.5194/tc-14-2495-2020.

**Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestvedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H., 2013:** Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

**Neumann B., Vafeidis A. T., Zimmermann J., Nicholls R. J., 2015:** Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding – A global assessment. PLoS One 10. doi:10.1371/journal.pone.0118571.

**O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G. A., Moss R., Riahi K., Sanderson B. M., 2016:** The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geoscientific Model Development, v. 9, pp. 3461-3482.

**Olson R., An S.-I., Fan Y., Evans J. P., Caesar L., 2018:** North Atlantic observations sharpen meridional overturning projections // Climate Dynamics, v. 50, pp. 4171-4188. doi:10.1007/s00382-017-3867-7.

**Paltan H., Allen M., Haustein K., Fuldauer L., Dadson S., 2018:** Global implications of 1.5 °C and 2 °C warmer worlds on extreme river flows // Environmental Research Letters, v. 13, 94003. doi:10.1088/1748-9326/aad985.

**Pendergrass A. G., Lehner F., Sanderson B. M., Xu Y., 2015:** Does extreme precipitation intensity depend on the emissions scenario? // Geophysical Research Letters, v. 42, pp. 8767-8774. doi:10.1002/2015GL065854.

**Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A., 2003:** Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // Journal Geophysical Research, v. 108, No. D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

**Riahi K., van Vuuren D. P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B. C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Crespo Cuaresma J., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Aleluia Da Silva L., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Strefler J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A., Tavoni M., 2017:** The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview // Global Environmental Change, v. 42, pp. 153-168.

**Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L., 2016:** Allowable $CO_2$ emissions based on regional and impact-related climate targets // Nature, v. 529, pp. 477-483. doi:10.1038/nature16542.

**Sillmann J., Stjern C. W., Myhre G., Forster P. M., 2017:** Slow and fast responses of mean and extreme precipitation to different forcing in CMIP5 simulations // Geophysical Research Letters, v. 44, pp. 6383-6390. doi:10.1002/2017GL073229.

**Tamarin-Brodsky T., Kaspi Y., 2017:** Enhanced poleward propagation of storms under climate change // Nature Geoscience, v.10, pp. 908-913. doi:10.1038/s41561-017-0001-8.

**Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012:** An Overview of CMIP5 and the experiment design // Bulletin of the American Meteorological Society, v. 93, pp. 485-498. doi10.1175/BAMS-D-11-00094.1

**Tebaldi C., Debeire K., Eyring V., Fischer E., Fyfe J., Friedlingstein P., Knutti R., Lowe J., O'Neill B., Sanderson B., van Vuuren D., Riahi K., Meinshausen M., Nicholls Z., Tokarska K. B., Hurtt G., Kriegler E., Lamarque J.-F., Meehl G., Moss R., Bauer S. E., Boucher O., Brovkin V., Byun Y.-H., Dix M., Gualdi S., Guo H., John J. G., Kharin S., Kim Y., Koshiro T., Ma L., Olivié D., Panickal S., Qiao F., Rong X., Rosenbloom N., Schupfner M., Séférian R., Sellar A., Semmler T., Shi X., Song Z., Steger C., Stouffer R., Swart N., Tachiiri K., Tang Q., Tatebe H., Voldoire A., Volodin E., Wyser K., Xin X., Yang S., Yu Y., Ziehn T., 2021**: Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison

Project (ScenarioMIP) of CMIP6 // Earth System Dynamics, v. 12, pp. 253-293.

T**okarska K. B., Stolpe M. B., Sippel S., Fischer E. M., Smith C. J., Lehner F., Knutti R., 2020:** Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models // Science Advances, v. 6(12). https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9549

**van Vuuren D. P., Riahi K., Moss R., Edmonds J., Thomson A., Nakicenovic N., Kram T., Berkhout F., Swart R., Janetos A., Rose S. K., Arnell N., 2012:** A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities // Global Environmental Change, v. 22, pp. 21-35.

**van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K., 2011:** The representative concentration pathways: An overview // Climatic Change, v. 109 (1), pp. 5-31, doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.

**Vecchi G. A., Delworth T. L., Murakami H., Underwood S. D., Wittenberg A. T., Zeng F., Zhang W., Baldwin J. W., Bhatia K., Cooke W., He J., Kapnick S. B., Knutson T., Villarini G., van der Wiel K., Anderson W., Balaji V., Chen J., Dixon K., Gudgel R., Harris L., Jia L., Johnson N., Lin S., Liu M., Ng J., Rosati A., Smith J., Yang X., 2019:** Tropical cyclone sensitivities to $CO_2$ doubling: roles of atmospheric resolution, synoptic variability and background climate changes // Climate Dynamics, v. 53 (9-10), pp. 5999-6033. doi:10.1007/s00382-019-04913-y.

**Vicente-Serrano S. M., McVicar T., Miralles D., Yang Y., Tomas-Burguera M., 2020:** Unravelling the influence of atmospheric evaporative demand on drought under climate dynamics // Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, v. 11, e632.

**Wang J., Chen Y., Tett S. F. B., Yan Z., Zhai P., Feng J., Xia J., 2020:** Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes // Nature Communications, v. 11, 11 p. doi:10.1038/s41467-019-14233-8.

**Weigel A. P., Knutti R., Liniger M. A., Appenzeller C., 2010:** Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections // Journal of Climate, v. 23, pp. 4175-4191. doi:10.1175/2010JCLI3594.1.

**Xu L., Chen N., Zhang X., 2019:** Global drought trends under 1.5 and 2 °C warming // International Journal of Climatology, v. 39, pp. 2375-2385. doi:10.1002/joc.5958.

**Yettella V., Kay J. E., 2017:** How will precipitation change in extratropical cyclones as the planet warms? Insights from a large initial condition climate model ensemble // Climate Dynamics, v. 49, pp. 1765-1781. doi:10.1007/s00382-25 016-3410-2.

**Zelinka M. D., Myers T. A., McCoy D. T., Po-Chedley S., Caldwell P. M., Ceppi P., Klein S. A., Taylor K. E., 2020:** Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models // Geophysical Research Letters, v. 47, pp. 1-12. doi:10.1029/2019gl085782.

**Zhao S., Zhang S., Cheng W., Zhou C., 2019:** Model Simulation and Prediction of Decadal Mountain Permafrost Distribution Based on Remote Sensing Data in the Qilian Mountains from the 1990s to the 2040s // Remote Sensing, v. 11, 19 p. doi:10.339

# 1.2 Изменения климата на территории Российской Федерации

## 1.2.1 Наблюдаемые изменения

*М. Ю. Бардин,*
*Н. М. Аржанова, С. Ю. Гаврилова,*
*В. Ю. Георгиевский, Г. В. Груза,*
*С. Г. Давлетшин, Т. В. Дементьева,*
*М. Д. Докукин, С. А. Журавлев,*
*В. А. Задворных, В. М. Ивахов,*
*Н. Н. Коршунова, Н. Н. Парамонова,*
*Т. В. Платова, Э. Я. Ранькова,*
*Е. Н. Русина, О. Ф. Самохина,*
*А. А. Соломатникова,*
*Е. И. Хлебникова, А. Б. Шерстюков*

### 1.2.1.1 Наблюдения за климатом, выполняемые Государственной наблюдательной сетью Российской Федерации

Основным источником данных наблюдений за климатом и его изменениями является Государственная наблюдательная сеть (ГНС) – наблюдательная сеть Росгидромета, состоящая из комплекса тематических наблюдательных сетей (Росгидромет, 2020).

Важнейшими компонентами системы наблюдений за климатическими изменениями в составе ГНС являются наземная метеорологическая, аэрологическая, гидрологическая, морская гидрометеорологическая наблюдательные сети, сети мониторинга химического состава и соответствующих характеристик атмосферы в рамках Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО.

Особое место занимают спутниковые наблюдения за различными компонентами климатической системы при мониторинге облачности, криосферы (в том числе в горных районах), биосферы, гидрологических объектов и прибрежных территорий. Спутниковые наблюдения требуют тщательной калибровки по наземным наблюдениям. Получаемые со спутников данные используются, в числе прочего, для оценки антропогенных воздействий и частично для решения задач в интересах исследования климата.

Наблюдательная сеть Росгидромета является важной частью общемирового климатического мониторинга. Эмпирический анализ данных об изменении климата опирается на результаты непосредственных приземных наблюдений, к временным рядам которых предъявляются особые требования, сформулированные в документах ВМО (ВМО, 2014, 2017) и применяемые в Российской Федерации:

– Продолжительность временных рядов данных, достаточная для анализа изменений климата на временных масштабах от нескольких десятилетий и более (для долгосрочной оценки изменения климата желательно иметь данные с середины прошлого века, включая нормы за принятый базовый период (в настоящем разделе везде, где не указано иное, базовый период – 1961-1990 гг.)).

– Однородность временных рядов данных, отсутствие в них систематических расхождений, обусловленных изменением методов измерений, методик обработки данных, переносом станции или изменения во времени (зарастания, застройки и др.) состояния ближайшего окружения пункта наблюдения. Неоднородность рядов в той или иной степени присуща всем долговременным наблюдениям и может стать серьезной проблемой для климатических исследований. Существуют разные методы выявления неоднородности рядов с после-

дующей корректировкой данных за прошлые годы. На климатической сети Росгидромета в случае переноса станции или замены типа системы измерений проводятся параллельные наблюдения в течение определенного ВМО периода. Результаты наблюдений одной и той же станции могут быть однородными по одним параметрам и неоднородными по другим, именно поэтому исследования климатообразующих факторов, приведенные в данной главе, основываются не на идентичных наборах станций.

– Репрезентативность пункта наблюдений относительно общего фона климатообразующих и других природных факторов, обеспечивающая необходимую точность получения фоновых значений гидрометеорологических величин для любой точки территории между пунктами наблюдений. Для климатических исследований важны пункты наблюдений, расположенные в местах, где изменения окружающей среды, вызванные деятельностью человека, минимальны. Это требование относится как к физическим характеристикам атмосферы, так и к ее химическому составу.

– Сопоставимость данных наблюдений на всем пространстве страны и сопоставимость российских данных наблюдений с данными международных наблюдательных сетей. Это требование вытекает из необходимости глобальных оценок климата и его изменений, поскольку изменения климата на территории России обусловлены как региональными, так и глобальными процессами.

– Высокий уровень качества данных наблюдений. Поскольку климатические изменения характеристик атмосферы происходят очень медленно, для их обнаружения вся информация ГНС перед помещением ее в Единый государственный фонд данных подвергается процедурам многоуровневого контроля качества, в процессе которого устанавливается достоверность данных.

Для адекватной оценки состояния и изменений климата в глобальном и региональном масштабах, особенно в потенциально уязвимых к изменениям регионах, должны соблюдаться требования к пространственному размещению пунктов наблюдений. Национальные климатические сети создаются странами – членами ВМО в соответствии со своими потребностями, но с учетом принципов построения сети, требований к ее конфигурации, программам и частоте наблюдений.

**Наземная метеорологическая сеть Росгидромета**

Государственная наблюдательная сеть в настоящее время насчитывает 1591 функционирующую станцию с режимными метеорологическими наблюдениями, из которых 775 длиннорядных репрезентативных станций входят в состав национальной климатической (метеорологической) сети России (рис. 1.2.1.1). 237 станций этой климатической сети функционируют 100 лет и более. Существующая национальная климатическая сеть, не подлежащая закрытию и сокращению объемов и программ метеорологических наблюдений, позволяет удовлетворить государственные нужды в климатической метеорологической информации для определения тенденций климатических изменений на территории страны, за исключением северных регионов азиатской части России.

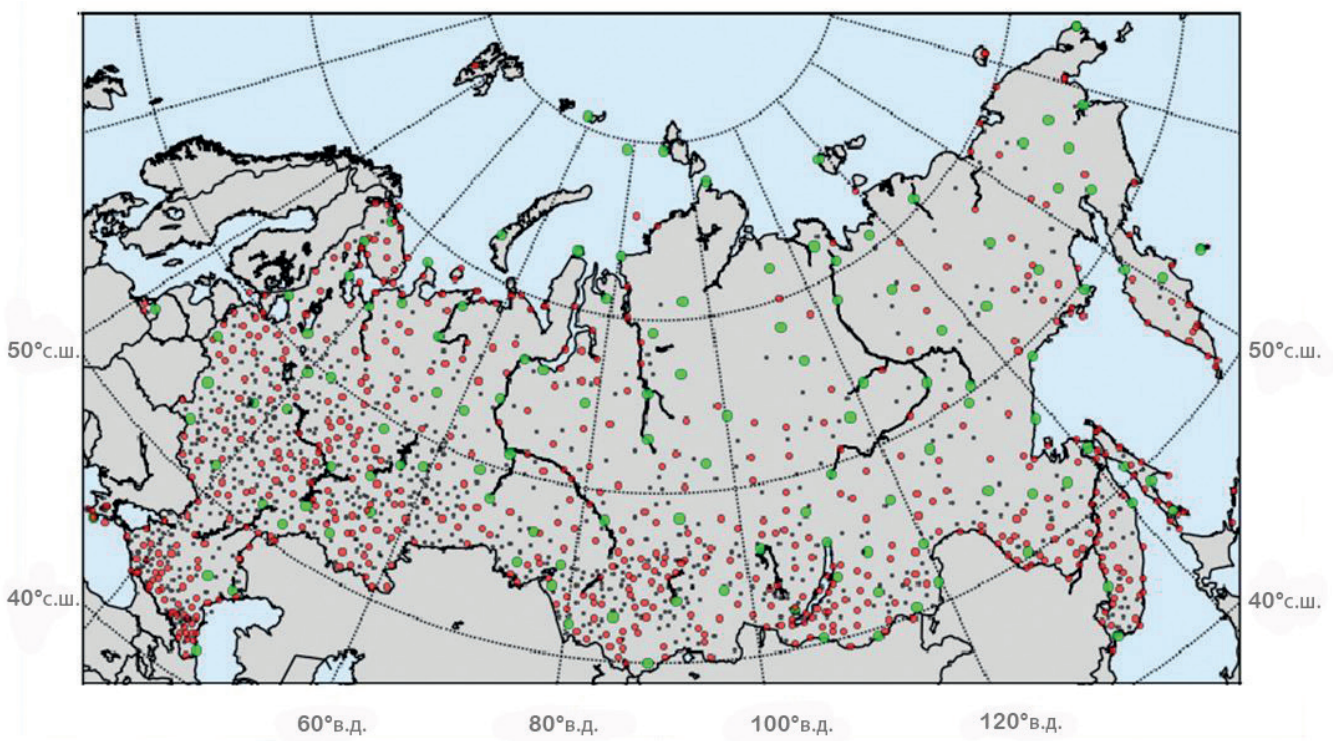



***Рис. 1.2.1.1*** *Государственная метеорологическая сеть*
*Станции обозначены на карте черными, зелеными, красными кружками:*
*зеленые кружки – 132 станции Глобальной системы наблюдения за климатом ВМО,*
*зеленые и красные кружки – 775 станций Национальной климатической (метеорологической) сети*

Максимального разрешения метеорологическая наблюдательная сеть достигла к середине восьмидесятых годов XX века, когда функционировало около 2300 станций, затем их количество начало постепенно сокращаться. В последние годы открываются новые автоматические не обслуживаемые персоналом станции (Обзор, 2021), но короткие ряды наблюдений и большое число пропусков данных не позволяют использовать их информацию для климатических обобщений.

Требования к составу, срокам и методам наблюдений описаны в (Наставление, 1969). В обязательную программу работ метеорологических станций входят наблюдения за температурой и влажностью воздуха, ветром, атмосферным давлением, температурой подстилающей поверхности, метеорологической дальностью видимости, количеством атмосферных осадков, характеристиками облачности и снежного покрова. На климатических станциях проводятся непрерывные круглосуточные метеорологические наблюдения за состоянием погоды, за атмосферными явлениями, неблагоприятными и опасными природными явлениями.

На ряде станций выполняется расширенная программа наблюдений за продолжительностью солнечного сияния, интенсивностью жидких атмосферных осадков, температурой почвы на глубинах, а также за характеристиками гололедно-изморозевых отложений и тепловым балансом. На 164 климатических станциях Росгидромета проводятся актинометрические наблюдения за радиационным балансом и его составляющими по различным программам.

Пункты наблюдений для каждого метеорологического параметра выбирались на основе

доступности однородных рядов достоверных данных с минимальным числом пропусков, достаточных для оценки долговременных изменений (трендов) в период современного потепления; по возможности равномерного покрытия территории страны, полноты отражения различных климатических условий и региональной репрезентативности результатов. Такой подход позволяет правильно интерпретировать и минимизировать неопределенности при изучении пространственно-временных изменений климатических характеристик.

**Морская гидрометеорологическая сеть Росгидромета**

Морская гидрометеорологическая сеть состоит из пунктов наблюдений, расположенных в прибрежной и шельфовой зонах окраинных и внутренних морей, в морских устьях рек, а также пунктов наблюдений, организованных на судах. Наиболее длинные и репрезентативные ряды наблюдений имеются на полярных гидрометеорологических станциях. Большинство станций ведут регулярные наблюдения с конца 1930-х – середины 1940-х гг.

Наблюдения на «вековых» береговых станциях осуществляются за уровнем моря, температурой воды, соленостью, состоянием ледяного покрова, толщиной льда у берега и на профилях. К системам наблюдений за параметрами водной среды и приводного слоя атмосферы относятся также автономные буйковые станции (океанографические буи).

Морские климатические наблюдения включены в глобальную систему океанических наблюдений ГСНК в открытых акваториях и прибрежных районах. 14 станций Росгидромета входят в состав глобальной системы наблюдений за уровнем моря (Global Sea Level Observing System, GLOSS).

В настоящее время по различным причинам, в основном финансового характера, сокращено более 40% морских реперных пунктов наблюдений, в результате чего Росгидромет имеет неполную климатическую (режимную) информацию о состоянии морей, омывающих Россию.

**Аэрологическая сеть Росгидромета**

Аэрологическое радиозондирование остается основным источником информации о состоянии атмосферы от поверхности Земли до высот 30-40 км (предельных высот подъема радиозонда). Аэрологические наблюдения на территории России проводятся в сроки 00 и 12 часов Всемирного скоординированного времени и включают в себя температурно-ветровое радиозондирование атмосферы.

В настоящее время на территории Российской Федерации функционируют 115 аэрологических станций, из них 14 станций (две из которых расположены в Антарктиде) входят в состав ГСНК (ГУАН). Сеть ГУАН образует минимальную конфигурацию аэрологических станций, необходимую для наблюдений за климатом в планетарном масштабе.

**Гидрологическая сеть Росгидромета**

Гидрологическая сеть наблюдений предназначена для осуществления мониторинга поверхностных водных объектов суши (рек, озер, водохранилищ, крупных каналов, болот). Государственная гидрологическая сеть наблюдений насчитывает 2983 поста, из которых 2646 ведут наблюдения на реках и 337 – на озерах и водохранилищах.

Гидрологические наблюдения как вклад в систему ГСНК осуществляются на основной и специализированной сетях. Для изучения многолетних изменений гидрологического режима рек и водоемов при изменении климата и антропогенных воздействий из состава основной гидрологической сети выделено 1262 реперных поста с рядами наблюдений 60 лет и более.

В настоящее время наблюдения по ограниченному числу гидрометеорологических показателей осуществляются на пяти воднобалансовых и двух болотных станциях. Наблюдения за испарением с водной поверхности проводятся в 102 пунктах, размещенных на метеорологических станциях; с поверхности почвы – на 20 почвенно-испарительных площадках, с поверхности снега – на 10 снегоиспарительных площадках.

**Сеть наблюдений за составом атмосферы Росгидромета**

Глобальная служба атмосферы ВМО предназначена для мониторинга химического состава и соответствующих характеристик атмосферы для выполнения оценок антропогенного воздействия на окружающую среду, а также для прогнозирования будущего состояния климатической системы Земли. Станции этой Службы размещаются в местах, удаленных от непосредственного воздействия источников выбросов в атмосферу.

Некоторые компоненты ГСА функционируют в России с 1950-х гг., например, регулярные измерения общего содержания озона в атмосфере. Наземная озонометрическая сеть Росгидромета включает 28 станций, выполняющих ежедневные измерения общего содержания озона (ОСО), 18 из которых оснащены автоматическими приборами отечественного производства.

Систематические измерения концентраций в приземном слое атмосферы наиболее значимых парниковых газов $CO_2$ и $CH_4$ в рамках программы ГСА ВМО выполняются на четырех станциях: Воейково, Териберка, Новый Порт, Тикси.

Национальная сеть наблюдений за химическим составом и кислотностью осадков представлена 221 станцией, включая 10 станций, работающих по программе ГСА ВМО. Результаты анализов направляются в Мировой центр данных ГСА.

Стратегией деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата) (Стратегия, 2010) предусмотрена необходимость развития системы комплексного мониторинга парниковых газов на территории России.

### 1.2.1.2 Температура приземного воздуха

Представленные ниже оценки получены в рамках оперативного мониторинга климата и его изменений (ИГКЭ, 2020) по данным инструментальных наблюдений на метеостанциях наблюдательной сети ВМО, в соответствии с утвержденной методикой обработки данных и расчета оценок (ЦМКП, 2016; Груза и др., 2017).

В качестве базового массива использован массив Т3288 (данные ИГКЭ) с данными о средней месячной температуре приземного воздуха за 1901-2020 гг. на 3288 наземных станциях глобальной сети. Для оценок на территории

России используются данные 577 российских станций (каталог станций, с координатами и сведениями о полноте наблюдений размещен на сайте ИГКЭ (http://climatechange.igce.ru)). Для пространственного осреднения станционные данные сначала осредняются по пятиградусным боксам (широтно-долготным прямоугольникам), после чего средние по ячейкам (боксам) вторично осредняются с весами, пропорциональными площади бокса. Текущие оценки трендов (1976-2020 гг.) сопоставляются с соответствующими оценками по состоянию на 2012 г. (1976-2012 гг.), чтобы показать динамику тенденций за период со времени выпуска Второго оценочного доклада (Росгидромет, 2014).

Многолетний ход температуры приземного воздуха над сушей (рис. 1.2.1.2) представляет собой достаточно нерегулярное чередование эпизодов с аномалиями разного знака (колебания с периодом порядка десятилетий). Однако сглаженные кривые (ход 11-летних скользящих средних) выявляют доминирующую направленность происходящих изменений, в частности – тенденцию к потеплению с середины 1970-х гг. Эта тенденция прослеживается в ходе температуры как для земного шара в целом, так и в среднем по территории России. Наблюдавшееся в первой половине XX века потепление, как и последовавшее затем до 1970-х гг. похолодание, связано в основном с естественными причинами (IPCC 2013, 2014). В связи с этим период с середины 1970-х гг. выделяется как период современного глобального потепления, а 1976 год условно принят за его начало (Росгидромет, 2008, 2014; Бардин и др., 2021).

Самым теплым годом в истории наблюдений (в целом по России) оказался 2020 год (Груза и др., 2021), когда осредненная по территории России среднегодовая температура оказалась на 3,22 °С выше климатической нормы 1961-1990 гг. и на 1,03 °С выше предыдущего температурного рекорда 2007 г. (аномалия +2,19 °С ).

В годовом ходе выделяются рекордно теплые зима, весна и осень того же 2020 года с аномалиями: +5,00, +3,94, +3,29 °С (рис. 1.2.1.3). Лето было самым теплым в 2016 г. (аномалия +1,85 °С), а в 2020 г. – только пятым (детали см. на рис. 1.2.1.3). Количественные оценки годовых и сезонных трендов для периодов 1976-2020 и 1976-2012 гг. приведены на рисунках 1.2.1.2, 1.2.1.3 и в табл. 1.2.1.1.

В табл. 1.2.1.1 представлены параметры тренда: **b**, °С/10 лет – коэффициент линейного тренда, **D**,% – доля дисперсии ряда, учтенная трендом, и **α,%** – критический уровень статистической значимости: минимальный уровень значимости, на котором нулевая гипотеза b = 0 может быть отвергнута. Линейный тренд, в среднем за год и во все сезоны, положителен в оба периода, то есть можно говорить о потеплении климата России после 1976 г., продолжающемся и после 2012 г. (даже с некоторым усилением). При этом в среднем за год и для всех сезонов, кроме зимы, оценки тренда (средняя скорость потепления) статистически значимы в оба периода на очень высоком уровне ($\alpha < 0{,}001$). Но для зимних сезонов оценки за 1976-2012 гг. статистически незначимы, тогда как к 2020 году тенденция к потеплению заметно усилилась (с 0,21 до 0,48 °С/10 лет) и стала статистически значима на критическом уровне $\alpha = 1{,}1\%$.

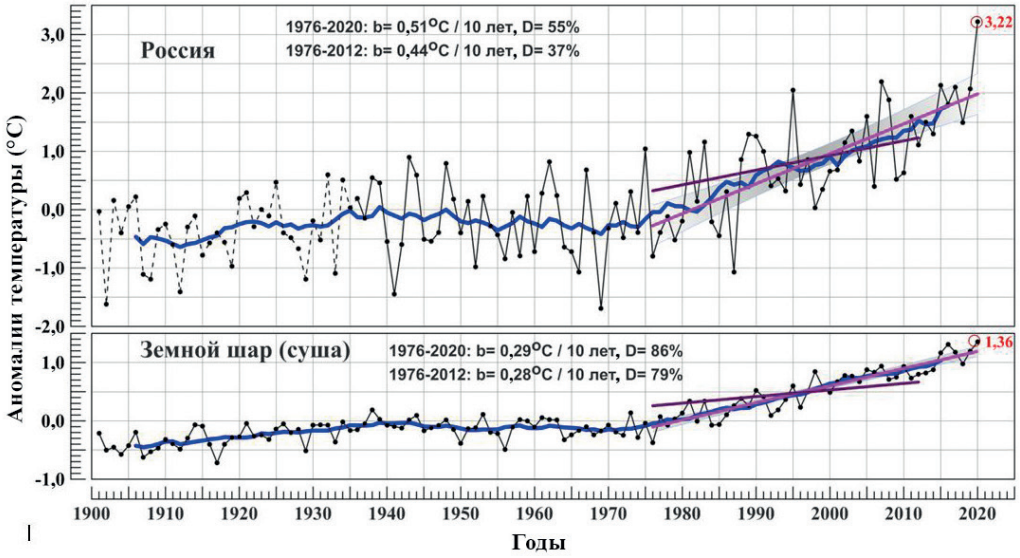



***Рис. 1.2.1.2*** *Ход среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха над сушей (°C), осредненных по территории России (вверху) и земного шара (внизу), 1901-2020 гг.*

*Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезки прямых сиреневого и фиолетового цвета – линейный тренд за 1976-2020 (с 95%-м доверительным интервалом) и 1976-2012 гг.*

*Ход до 1936 г. показан пунктиром, т.к. наблюдения этого периода менее однородны*

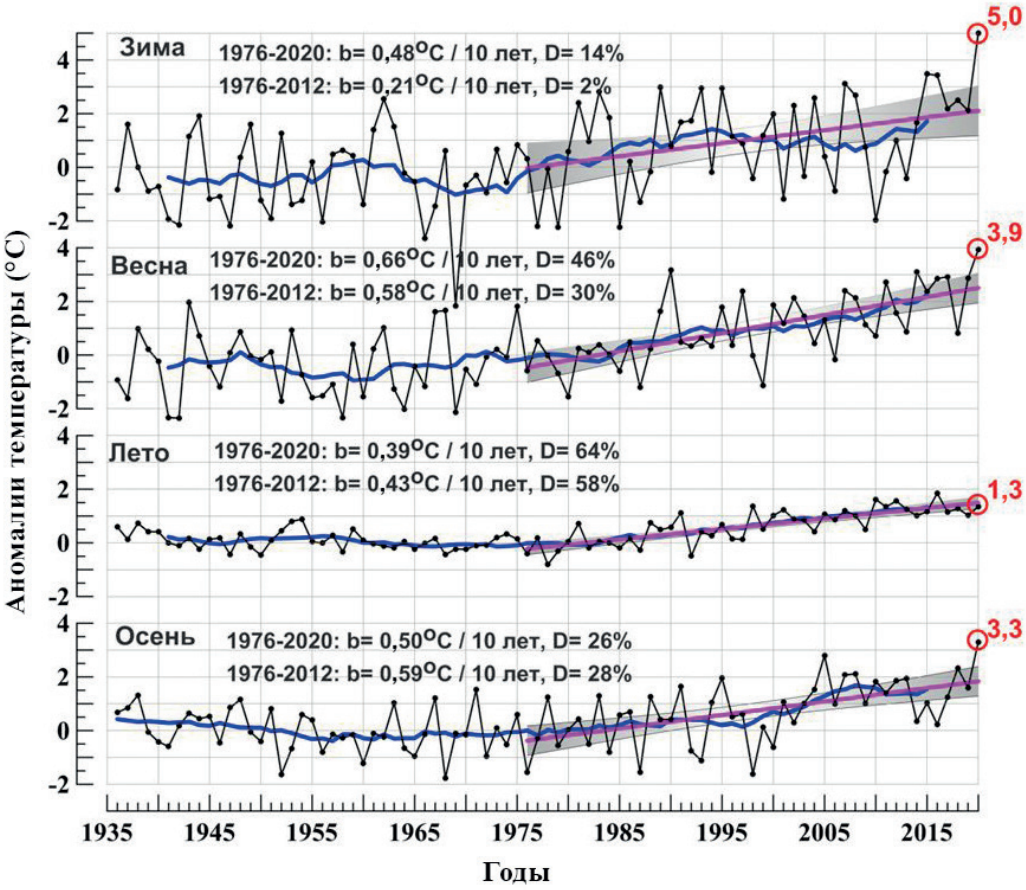



***Рис. 1.2.1.3*** *Изменение осредненных по территории России сезонных аномалий температуры приземного воздуха*

*Обозначения см. рис. 1.2.1.2*

Таким образом, для всех сезонов и года в целом факт потепления климата России (в среднем по территории) в течение 1976-2020 гг. не может быть отвергнут с высокой степенью уверенности (доверительная вероятность не ниже 98,9%). Более того, потепление происходит не только в среднем по территории России, но и на региональном уровне, во всех физико-географических регионах и федеральных округах. Региональные оценки для среднегодовой температуры (табл. 1.2.1.2) в оба периода для всех регионов положительны, статистически значимы (почти все – на 1%-м уровне) и за последние восемь лет изменились несущественно. Этот вывод можно отнести и ко всем сезонам, кроме зимнего.

***Таблица 1.2.1.1***

*Параметры линейного тренда осредненной по территории России приземной температуры воздуха (в целом за год и по сезонам)*

| Сезон | 1976–2020 | | | 1976–2012 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *b* | *D(%)* | *α(%)* | *b* | *D(%)* | *α(%)* |
| **Год** | 0,51 | 55 | 0,0 | 0,44 | 37 | 0,0 |
| **Зима** | 0,48 | 14 | 1,1 | 0,21 | 2 | 40,4 |
| **Весна** | 0,67 | 46 | 0,0 | 0,58 | 30 | 0,0 |
| **Лето** | 0,39 | 64 | 0,0 | 0,43 | 58 | 0,0 |
| **Осень** | 0,50 | 26 | 0,0 | 0,55 | 28 | 0,1 |

*Примечание.* ***b*** *(°C/10 лет)* – коэффициент линейного тренда, ***D*** *(%)* – вклад в дисперсию, ***α*** *(%)* – вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии тренда

Оценки тренда зимних температур (табл. 1.2.1.2) за 1976-2012 гг. во всех регионах, включая федеральные округа, не позволяют сколько-нибудь уверенно отвергнуть нулевую гипотезу (о ложном тренде). К 2020 г. тренд (за 1976-2020 гг.) в ряде сибирских регионов все еще статистически незначим, но с меньшим критическим уровнем и притом формально усилился. Максимальная интенсивность потепления в 1976-2020 гг. отмечается в регионах: Средняя Сибирь – весной (+0,87 °C/10 лет), Восточная Сибирь – весной и осенью (+0,81 и +0,85 °C/10 лет), и ЕТР – зимой и летом (+0,72 и +0,46 °C/10 лет).

В целом за год локальные тренды за 1976-2020 гг. на всей территории России положительны и подтверждают вывод о продолжающемся повсеместно потеплении климата (рис. 1.2.1.4). Общая картина потепления от 1976-2012 гг. к 1976-2020 гг. изменилась несущественно, но стала более однородной. Основное изменение касается обширной территории на юге АТР, где к 2012 г. сформировалась обширная область наиболее слабого (на территории России) потепления с минимумом на территории Алтая (тренд положительный, близкий к нулю). К 2020 г. эта область сохранилась только в границах Алтая (с трендом до +0,3 °C/10 лет), а об-

ласть потепления выше +0,6 °С/10 лет вдоль северного побережья России (от Ямала до Чукотки) распространилась на юг до 60-й параллели и на северо-западную часть ЕТР, включая побережье Баренцева и Белого морей.

***Таблица 1.2.1.2***

*Коэффициенты линейного тренда (°С/10 лет) регионально осредненной температуры приземного воздуха (в целом за год и по сезонам)*

| Регион | 1976–2020 | | | | | 1976–2012 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Год | Зима | Весна | Лето | Осень | Год | Зима | Весна | Лето | Осень |
| *Физико-географические регионы России* | | | | | | | | | | |
| ЕТР | **0,55** | **0,72** | **0,44** | **0,46** | **0,55** | **0,52** | 0,45 | **0,43** | **0,58** | **0,65** |
| АТР | **0,50** | *0,40* | **0,75** | **0,37** | **0,49** | **0,41** | 0,13 | **0,63** | **0,38** | **0,52** |
| Западная Сибирь | **0,42** | 0,35 | **0,75** | **0,26** | 0,31 | *0,31* | –0,01 | **0,68** | 0,21 | 0,44 |
| Средняя Сибирь | **0,59** | 0,54 | **0,87** | **0,45** | *0,44* | **0,43** | 0,23 | **0,69** | **0,41** | 0,38 |
| Прибайкалье и Забайкалье | **0,42** | 0,29 | **0,66** | **0,46** | 0,24 | **0,35** | 0,12 | **0,55** | **0,53** | 0,29 |
| Приамурье и Приморье | **0,37** | **0,42** | **0,41** | **0,22** | **0,42** | **0,39** | 0,43 | 0,29 | **0,35** | **0,50** |
| Восточная Сибирь | **0,60** | *0,35* | **0,81** | **0,40** | **0,85** | **0,51** | 0,01 | **0,73** | **0,45** | **0,83** |

*Примечание*. Жирным шрифтом выделены коэффициенты тренда, статистически значимые на 1%-м уровне; курсивом – на 5%-м уровне

Максимум потепления весной и осенью наблюдается на арктическом побережье АТР (до +1,5 °С/10 лет, на Таймыре и на побережье Восточно-Сибирского моря), зимой и летом – на территории ЕТР (до +1,1 °С/10 лет: зимой – на северо-западе, летом – южнее 55-й параллели). Минимум потепления (в среднем за год и во все сезоны, кроме весны), как и ранее, отмечается на юге Сибири, где зимой, на фоне области слабого положительного тренда, сохранилась небольшая область с тенденцией к похолоданию; зимняя область похолодания на Чукотке исчезла. В целом для России, среднегодовая скорость потепления увеличилась за это время от +0,44 до +0,51 °С/10 лет[1], а вклад тренда в дисперсию – от 37 до 55%. Основные особенности во все, кроме зимы, сезоны изменились несущественно.

[1] В 2021 г. это значение понизилось до 0,49 °С/10 лет.

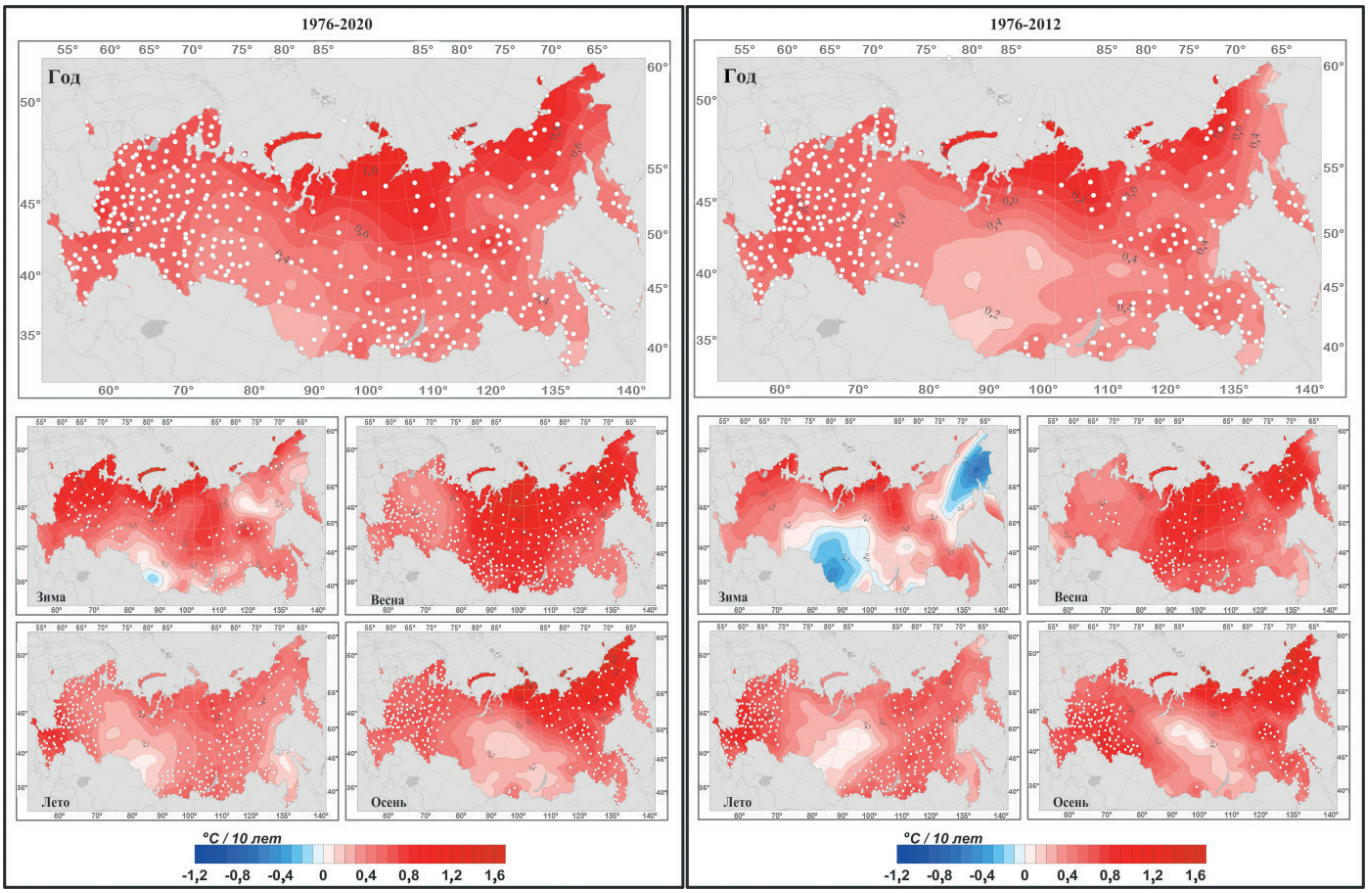



***Рис. 1.2.1.4*** *Географическое распределение коэффициентов линейного тренда (°C/10 лет) среднегодовой и сезонных температур на территории России за 1976-2020 и 1976-2012 гг.*

*Оценки трендов рассчитаны в точках расположения станций. Белыми кружками показано местоположение станций, для которых тренд статистически значим на 1%-м уровне*

### 1.2.1.3 Атмосферные осадки

Используемый массив включает данные о месячных суммах атмосферных осадков (с 1886 г.) на 455 станциях, расположенных на постсоветской территории (из них 310 станций – российские) (Методика, 2016). В этом массиве исторические ряды до 1966 г. содержат две системы поправок: на смачивание (Наставление, 1969; МУ, 1969а; внесены ретроспективно) и на приведение данных дождемера к показаниям осадкомера (Швер, 1976). Данные наблюдений после 1966 года до настоящего времени получены с использованием осадкомера и содержат только поправки на смачивание, введенные наблюдателем в каждое измерение (Наставление, 1969; МУ, 1969б).

Аномалии рассчитаны как отклонения от норм 1961-1990 гг. и суммированы внутри каждого календарного сезона и года в целом (мм/сезон, мм/год). При расчете оценок тренда, наряду с аномалиями в абсолютной шкале, используются относительные аномалии, т.е. суммы осадков, выраженные в процентах от нормы 1961-1990 гг. Тренды сезонных и годовых аномалий в абсолютной шкале приводятся к месячному масштабу (мм/месяц/10 лет).

Регионально осредненные оценки приведены для территории России в целом, шести крупных физико-географических регионов и шести федеральных округов Российской Федерации, границы которых указаны в (Росгидромет, 2014,

2020). Пространственное осреднение, как и для температуры, выполнено двухэтапной процедурой: см. пункт 1.2.1.2.

Самое общее представление о характере современных изменений режима атмосферных осадков на территории Российской Федерации дают временные ряды их осредненных по всей территории годовых (рис. 1.2.1.5) и сезонных (рис. 1.2.1.6) аномалий. В целом по России тренд годовых сумм осадков за период 1976-2020 гг. положительный (+0,84 мм/месяц/10 лет или +10,08 мм/год/10 лет), он описывает 39% межгодовой изменчивости ряда, статистически значим на 1%-м уровне. Линейное изменение за этот период составляет 9% нормы.

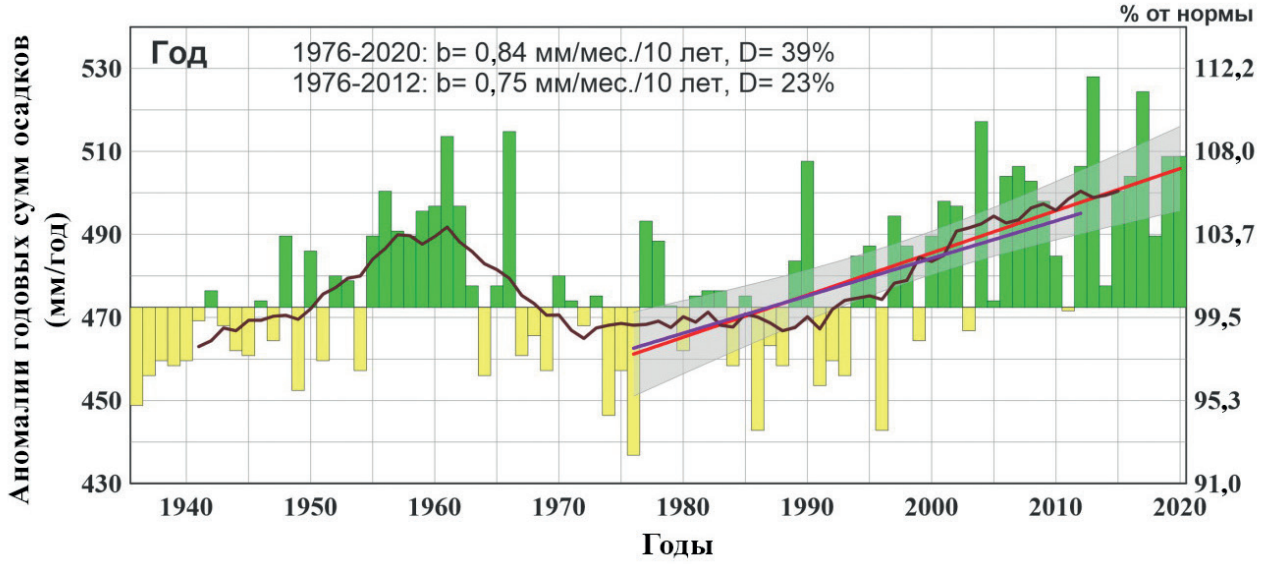



***Рис. 1.2.1.5*** *Ход осредненных по территории Российской Федерации аномалий годовых сумм осадков (мм/год – левая шкала,% от нормы – правая шкала), 1936-2020 гг.*

*Дополнительно показаны: ход 11-летних скользящих средних (черная кривая); линейный тренд за 1976-2020 с 95%-м доверительным интервалом и линейный тренд за 1976-2012 гг.*

***Таблица 1.2.1.3***

*Оценки линейного тренда средних годовых и сезонных месячных сумм осадков, в среднем по территории России за 1976-2020 и 1976-2012 гг.*

| Сезон | 1976–2020 | | | 1976–2012 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *b* | *D(%)* | *a(%)* | *b* | *D(%)* | *a(%)* |
| **Год** | 0,8 | 39 | 0,0 | 0,8 | 23 | 0,3 |
| **Зима** | 0,7 | 16 | 0,6 | 0,3 | 3 | 30,5 |
| **Весна** | 1,6 | 39 | 0,0 | 1,4 | 23 | 0,3 |
| **Лето** | 0,4 | 4 | 18,8 | 0,3 | 1 | 55,6 |
| **Осень** | 0,6 | 7 | 7,9 | 0,9 | 9 | 7,1 |

*Примечание*: ***b****(мм/мес/10лет)* – коэффициент линейного тренда, ***D****(%)* – вклад тренда в дисперсию, ***a****(%)* – критический уровень значимости

Основной вклад тренда в суммарную изменчивость принадлежит весеннему и зимнему сезонам (39 и 16% соответственно), тогда как в летний и осенний сезоны линейный тренд практически отсутствует. Однако именно в эти сезоны на территории России в среднем выпадает наибольшее количество осадков. Так, климатическая норма 1961-1990 гг. составляет менее 90 мм/сезон в зимне-весенний период года и 126-193 мм/сезон в летне-осенний. Линейный рост весенних осадков составил с 1976 года 26% нормы, а зимних – только 14%.

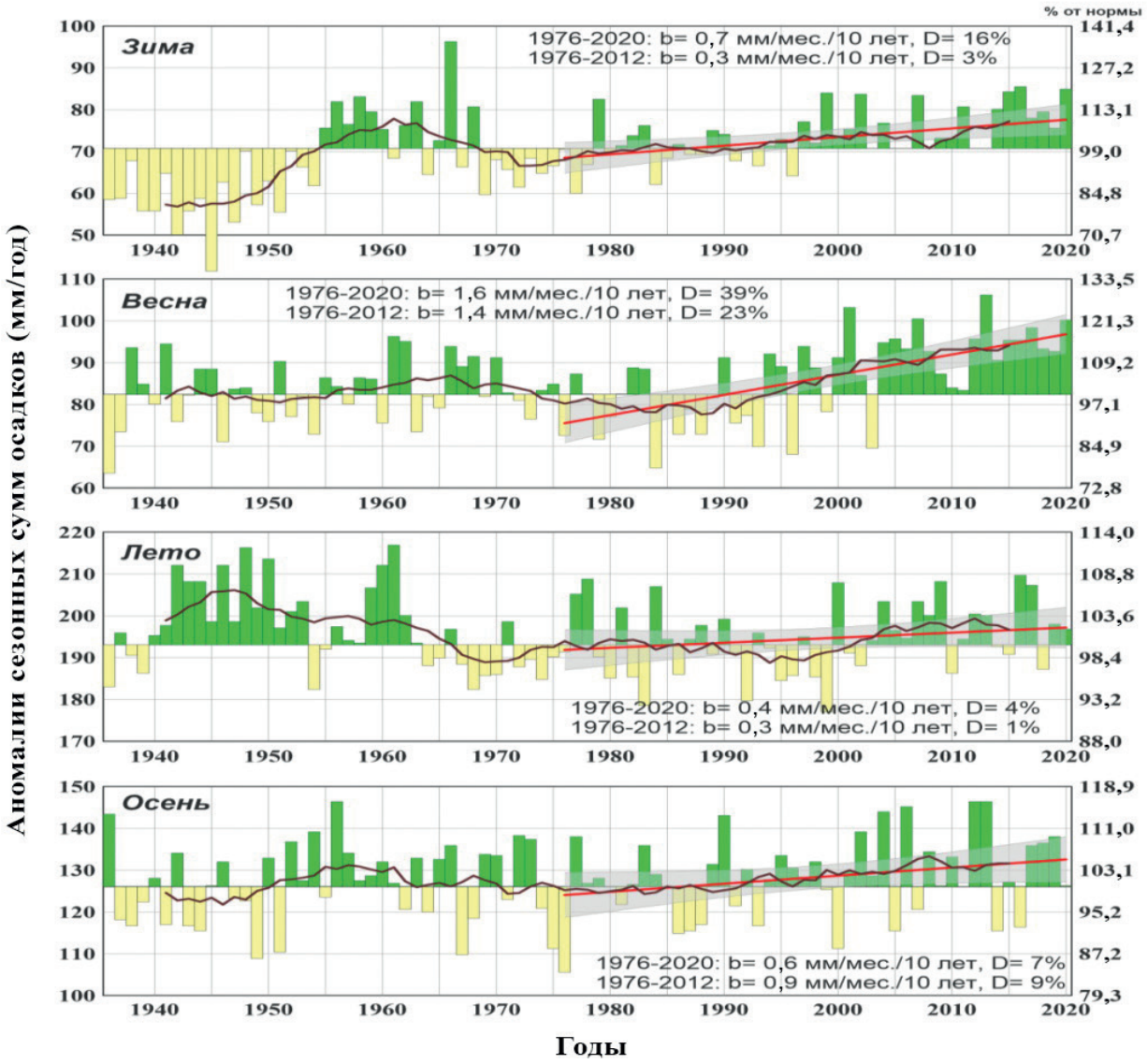



***Рис. 1.2.1.6*** *То же, что и рис. 1.2.1.5, но для сезонных сумм осадков*

Приведенные оценки (табл. 1.2.1.3) и временные ряды (рис. 1.2.1.5, 1.2.1.6) указывают на общую для года и всех сезонов тенденцию к увеличению осадков в среднем по территории России (тренд положительный). Региональные и сезонные оценки трендов (табл. 1.2.1.4) уточняют особенности каждого отдельного региона и сезона.

По сравнению с периодом 1976-2012 гг. тренды (средняя скорость изменения количества осадков) изменились незначительно, но и в целом за год, и во все сезоны, кроме осени, увеличилась их достоверность: доверительная вероятность тренда зимних осадков увеличилась от 69,5 до 99,4%, а летних – от 44,4 до 81,2%.

Во всех физико-географических регионах тренд годовых сумм оказался положительным (выявлен рост количества осадков), но в некоторых регионах он статистически незначим ($\alpha > 10\%$), в том числе: на ЕТР (включая ФО: Приволжский, Южный и Северо-Кавказский) и на АТР – Прибайкалье-Забайкалье. В остальных регионах АТР, включая Уральский, Сибирский и Дальневосточный ФО, оценки уверенно подтверждают тенденцию к увеличению годовых сумм осадков в течение 1976-2020 гг.: $\alpha \leq 5\%$ и даже $\alpha < 0{,}1\%$.

Из сезонов выделяется весна, когда в большинстве регионов тренд статистически значим на 5%-м уровне (за исключением регионов: Прибайкалье и Забайкалье, Приамурье и Приморье). В остальном тренд достоверен избирательно: на АТР – в течение всего года, на ЕТР – в зимне-весенний период; в сибирских регионах – весной; в Восточной Сибири – осенью.

Пространственные распределения локальных коэффициентов тренда (рис. 1.2.1.7) хорошо согласуются с региональными оценками (табл. 1.2.1.4) и дополняют их.

***Таблица 1.2.1.4***

*Коэффициенты линейного тренда (мм/месяц/10 лет) средних годовых и сезонных месячных сумм осадков за 1976-2020 и 1976-2012 гг. (в среднем по территории физико-географических регионов Российской Федерации)*

| Регион | 1976–2020 | | | | | 1976–2012 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Год | Зима | Весна | Лето | Осень | Год | Зима | Весна | Лето | Осень |
| ЕТР | 0,4 | **1,1** | ***1,8*** | –1,1 | –0,3 | 0,4 | 0,7 | **1,9** | –1,5 | 0,6 |
| АТР | ***1,0*** | **0,5** | ***1,5*** | **0,9** | ***1,0*** | **0,8** | 0,2 | ***1,3*** | 0,9 | **1,0** |
| Западная Сибирь | ***1,0*** | 0,4 | ***2,3*** | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,2 | ***1,9*** | 0,4 | 0,3 |
| Средняя Сибирь | ***1,0*** | 0,6 | ***1,4*** | 1,4 | 0,8 | ***1,1*** | 0,0 | **0,8** | ***2,7*** | **1,1** |
| Прибайкалье и Забайкалье | 0,6 | **0,4** | 0,6 | 0,6 | 0,9 | **1,1** | 0,5 | 0,9 | 1,9 | 1,2 |
| Приамурье и Приморье | ***1,3*** | 0,8 | 1,7 | 2,5 | 0,4 | 0,5 | 1,1 | 1,6 | –0,8 | –0,1 |
| Восточная Сибирь | ***1,0*** | 0,4 | ***1,2*** | –0,1 | ***2,2*** | 0,9 | –0,4 | ***1,1*** | –0,1 | **2,1** |

*Примечание*: Коэффициенты тренда, статистически значимые на 5%-м уровне, показаны жирным шрифтом; на 1%-м уровне – жирным курсивом. Серой заливкой отмечены тренды, незначимые на уровне $\boldsymbol{\alpha = 5\%}$. Отрицательные значения тренда показаны шрифтом синего цвета

В изменении годовых сумм осадков в течение 1976-2020 гг. на территории России преобладает тенденция к увеличению количества осадков (положительный тренд), но величина тренда (средняя скорость изменения) составляет более 4% годовой нормы за 10 лет только в бассейне Енисея и в отдельных областях Дальнего Востока. Убывание годовых сумм осадков (со ско-

ростью не более 6% нормы за 10 лет) выявлено на ЕТР в широтном поясе 50-60° с.ш., в Забайкалье, в районе Обской губы и вдоль побережья Восточно-Сибирского моря. В современных изменениях локальных сезонных сумм осадков (рис. 1.2.1.7) наиболее однородная картина отмечается весной, когда почти на всей территории России отмечается увеличение количества осадков, с максимумами до 16-18% нормы за 10 лет в Восточной Сибири. Сходная тенденция наблюдается также в Восточной Сибири осенью и в СЗФО зимой (увеличение количества осадков до 16-18% нормы за 10 лет). Однако практически во все сезоны, кроме весны, остается значительной территория, на которой выявляется тенденция к убыванию количества осадков. К таким районам относятся: зимой – АТР; летом – центральные и южные районы ЕТР (особенно Поволжье, до –15% нормы за 10 лет) и север АТР (Чукотка и Камчатка, до –9% нормы за 10 лет); осенью – центральные районы ЕТР и Урал (до 6-7% нормы за 10 лет).

В сравнении с оценками за 1976-2012 гг., общая картина наблюдаемых изменений, их основные сезонные и географические особенности за прошедшие восемь лет изменились несущественно (табл. 1.2.1.4, рис. 1.2.1.7; Росгидромет, 2014). В частности:

– сохранилась (и усилилась) тенденция увеличения количества годовых и весенних осадков на большей части территории страны и осенних – в Восточной Сибири;

– сохранилась тенденция к уменьшению количества летних осадков в центре и на юге ЕТР и на севере АТР;

– по-прежнему интенсивность изменений режима зимних и весенних осадков заметно выше, чем летних; осенью существенно увеличивается количество осадков на северо-востоке АТР.

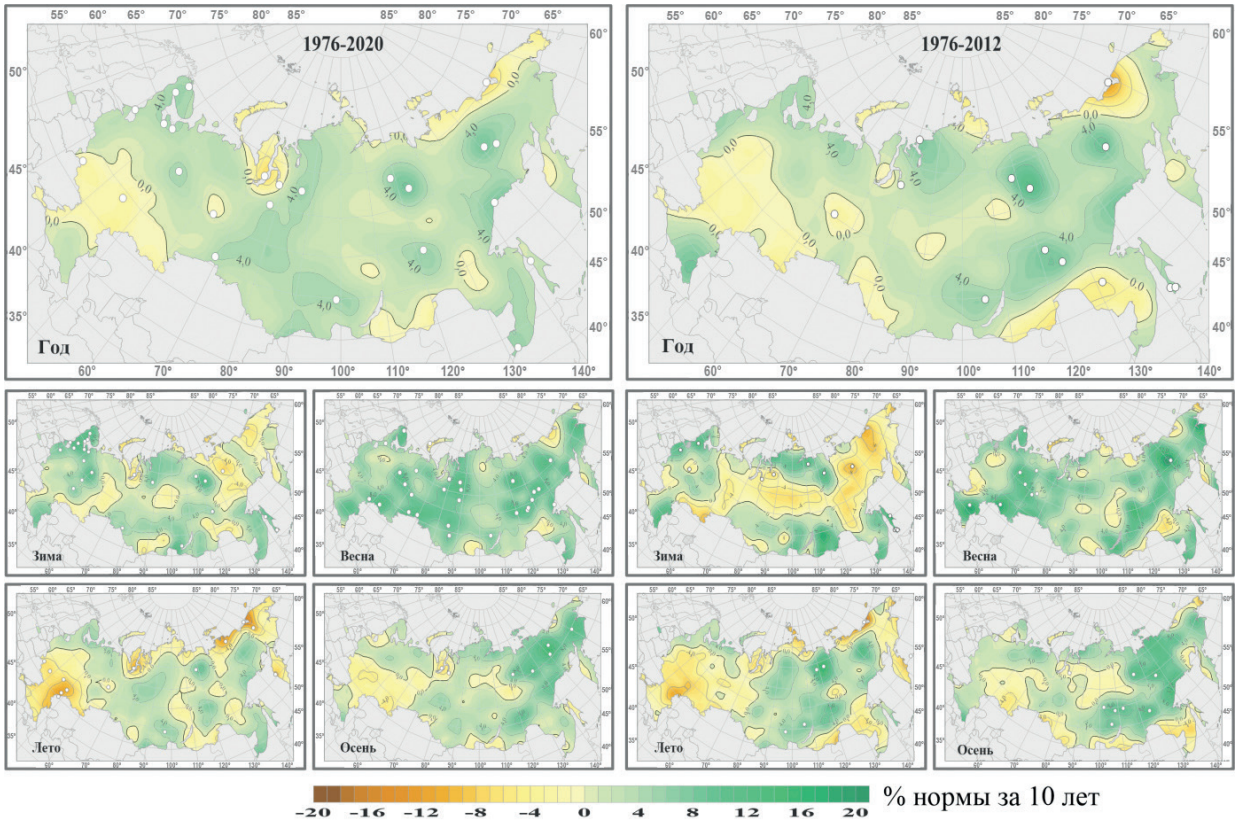



***Рис. 1.2.1.7*** *Пространственные распределения локальных коэффициентов линейного тренда годовых и сезонных сумм осадков на территории России (в % от нормы за 10 лет) за 1976-2020 гг. (слева) и за 1976-2012 гг. (справа)*

С другой стороны, сократилась область убывания летних сумм осадков на ЕТР, но увеличилась в районе Обской губы. Региональные оценки тренда практически во всех регионах почти не изменились, но их достоверность увеличилась.

### 1.2.1.4 Парниковые газы, аэрозоли, озоновый слой

**Парниковые газы**

Рассмотрение наблюдаемых изменений атмосферной концентрации парниковых газов на территории Российской Федерации в основном базируется на данных станций ФГБУ «ГГО», работающих по программе ГСА ВМО, достоинством которых является сопоставимость с данными мировой сети в рамках указанной программы. Мониторинг парниковых газов в системе Росгидромета осуществляется также на станциях Обнинск (ФГБУ «НПО «Тайфун») и Приокско-Террасный биосферный заповедник (ПТБЗ) (ФГБУ «ИГКЭ») (Росгидромет, 2021). Долгосрочные наблюдения за парниковыми газами также выполняются рядом научных организаций РАН (например, на станциях Института оптики атмосферы СО РАН на территории Западной Сибири).

Две станции: Териберка[1] и Тикси – расположены в условиях близких к фоновым, их данные представлены (Paramonova, Ivakhov, 2021) в Мировом центре данных по парниковым газам и используются для оценки глобальных изменений (см. гл. 1.1.1).

Тренд концентрации $CO_2$, определенный за десятилетний период, для этих станций (2,4 млн$^{-1}$/год и 2,5 млн$^{-1}$/год для станций Териберка и Тикси соответственно) согласуется со средним глобальным значением за период с 2009 по 2020 г., составившем 2,4 млн$^{-1}$/год (WMO, 2021). Изменение среднемесячных значений концентрации $CO_2$ и $CH_4$ на российских арктических станциях в сравнении с данными станции Барроу (NOAA, США) для пяти лет наблюдений показано на рис. 1.2.1.8. Особенности вариаций концентрации $CO_2$ и $CH_4$ на станции Новый Порт обусловлены наличием региональных естественных и антропогенных источников.

Среднегодовое значение на станциях Российской Федерации, расположенных в фоновых условиях, превысило в 2020 г. 415 млн$^{-1}$. Станции, подверженные влиянию региональных источников, также демонстрируют рост концентрации $CO_2$. Значения концентраций на этих станциях, как правило, выше фоновых (419 млн$^{-1}$ и 428 млн$^{-1}$ на станциях Новый Порт и Обнинск, соответственно), в то время как тренд концентрации $CO_2$, оцененный по длительному периоду наблюдений (2,4 млн$^{-1}$/год на станции Новый Порт и 2,5 млн$^{-1}$/год на станции Обнинск), совпадает с полученным для фоновых условий и средним глобальным значением (WMO, 2021).

В 2020 г. фоновые значения концентрации $CH_4$ составили 1980,4-1993,6 млрд$^{-1}$, возрастание за 2020 год произошло на 18,6 млрд$^{-1}$ и 9,9 млрд$^{-1}$ (станции Териберка и Тикси соответственно). Для станции Новый Порт концентрации $CH_4$ примерно на 60 млрд$^{-1}$ выше фоновых.

[1] На станции Териберка ряд наблюдений является самым длинным на территории Российской Федерации – более 30 лет (см. https://gaw.kishou.go.jp/search/graph/co2_ter_surface-flask_46_9999-9999_monthly.txt).

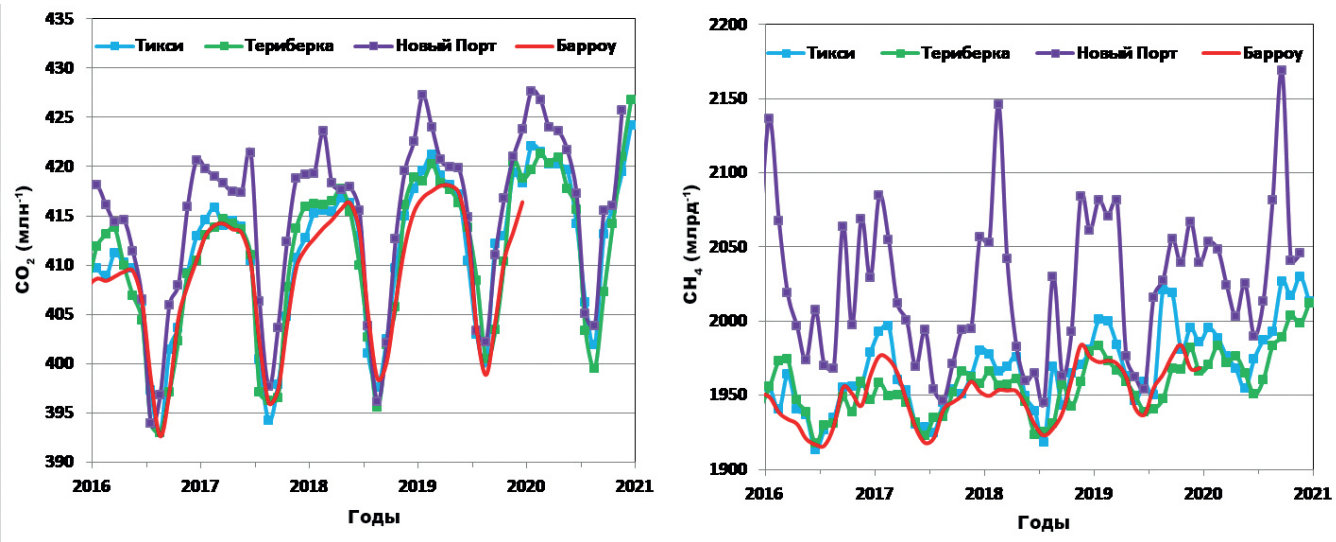



***Рис. 1.2.1.8*** *Временной ход концентрации $CO_2$ (слева) и $CH_4$ (справа) на российских арктических станциях в сравнении с данными станции Барроу (NOAA, США)*

В 2020 г. было зафиксировано снижение скорости изменения концентрации $CO_2$ до значений 1,7 млн$^{-1}$/год и 2,2 млн$^{-1}$/год для станций Териберка и Тикси соответственно. Оценки, представленные в (WMO, 2021), показывают, что сокращение ежегодных глобальных выбросов в результате ограничений, связанных с COVID-19, могут приводить к замедлению темпов роста содержания $CO_2$, на величину, не превышающую пределы естественной межгодовой изменчивости в 1 млн$^{-1}$.

Специфика внутригодовой изменчивости (сезонный ход, синоптические и суточные вариации) определяется влиянием региональных источников и стоков естественного (леса, болота, природные пожары и др.) и антропогенного (мегаполисы, сельское хозяйство, использование ископаемого топлива и др.) происхождения (Ивахов и др., 2019).

Данные станции Воейково, расположенной в окрестностях Санкт-Петербурга, являются информационной основой для оценки эмиссии парниковых газов с территории крупного промышленного центра (Zinchenko et al., 2002; Makarova et al., 2021). Превышение концентрации метана над фоновым уровнем для этой станции составляет в среднем порядка 4% за период 1996-2020 гг.

Результаты мониторинга атмосферной концентрации парниковых газов на территории Российской Федерации демонстрируют высокое согласие с тенденциями, наблюдаемыми на глобальной сети станций мониторинга. В то же время на российских станциях отчетливо проявляются региональные особенности, которые формируются за счет влияния большого числа разнообразных антропогенных и природных источников и стоков, расположенных в регионе.

### Общее содержание озона

Озонометрическая сеть Росгидромета состоит из 28 станций. Продолжительность наблюдений ОСО к настоящему времени составляет более 45 лет. Многолетние ряды позволили рассчитать климатические нормы, за которые приняты средние многолетние значения ОСО за 1973-2002 гг., и объективно оценивать отклонения в отдельные годы, долговременные

изменения толщины озонового слоя, тренды и тенденции в содержании озона для разных регионов Российской Федерации.

Среднегодовые значения ОСО над территорией Российской Федерации в целом за 1973-2020 гг. представлены на рис. 1.2.1.9. Весь 45-летний ряд значений ОСО может быть разделен на три периода с различным трендом межгодовых изменений ОСО:

– 1973-1993 гг.: значительное уменьшение ОСО (–1,5 е.Д./год) (е.Д. – единица Добсона);

– 1993-1999 гг. – значительный рост ОСО (более 3,0 е.Д./год);

– 1996-2020 гг. – существенные межгодовые колебания при незначительном отрицательном общем тренде, общее падение ОСО (–0,3 е.Д./год).

В 1993 г. наблюдалась минимальная толщина озонового слоя.

В течение 1973-2020 гг. толщина озонового слоя ниже нормы (353 е.Д.) более чем на 5% наблюдалась в 1992 г. (–5,4%), 1993 г. (–7,1%), 1995 г. (–5,9%), 2008 г. (–5,4%), 2011 г. (–5,8%).

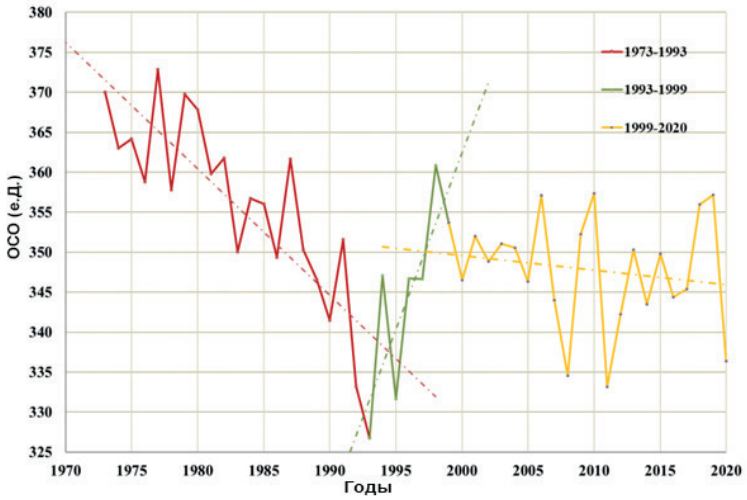



***Рис. 1.2.1.9*** *Среднегодовые значения ОСО над территорией Российской Федерации в период 1973-2020 гг.*

За 45 лет наблюдений над Российской Федерацией отчетливо проявилось чередование максимумов и минимумов среднегодовых значений ОСО с периодом ~2,4 года – «квазидвухлетняя» цикличность. Такого же рода вариации ОСО в умеренных и полярных широтах Северного полушария были отмечены и по данным мировой озонометрической сети.

В последнее время глубокие и обширные по площади «озоновые дыры» с отрицательными аномалиями до 70% наблюдались в Арктическом и Антарктическом регионах, а области с пониженными значениями концентрации озона распространялись до умеренных широт и сохранялись гораздо дольше, чем обычно. Реже наблюдались крупномасштабные положительные аномалии в поле концентрации озона, например, в первые месяцы 2018 года.

В целом с 2000 года наблюдается слабовыраженная тенденция к уменьшению средней толщины озонового слоя, которая заметнее проявляется в полярных и умеренных широтах.

**Аэрозоль**

В настоящее время по данным актинометрических наблюдений определяются только интегральные характеристики прозрачности атмосферы. В 2020 г. такие измерения проводили 84 станции актинометрической сети Росгидромета (Наставление, 1997). Для косвенной оценки аэрозольного ослабления с начала 1970-х годов используются наблюдения за интегральной оптической плотностью атмосферы (ОПА). Наблюдения выполняются на 10 станциях актинометрической сети Росгидромета. Станции расположены в различных климатических условиях: в Ленинградской области, в Республике Коми, на Урале, на Северном Кавказе, на озере Байкал, в Арктике. Для наблюдений применяется стандартная актинометрическая аппаратура (Наставление, 1997), а способ расчета ОПА указан, например, в (Русина, Боброва, 2021).

ОПА можно рассматривать как характеристику общего оптического замутнения атмосферы. Ее вариации определяются главным образом содержанием в атмосфере водяного пара и аэрозоля, причем влияние аэрозоля оказывается наиболее существенным.

Наблюдения ведутся на трех фоновых станциях: Усть-Вымь, Памятное и Хужир – и ближайших городских станциях – Сыктывкар, Курган и Иркутск, работающих в паре с этими фоновыми станциями. Кроме трех указанных региональных фоновых станций, действуют четыре станции, не имеющие пары: Шаджатмаз, Туруханск, Воейково и арктическая станция на о-ве Диксон, присоединившаяся к программе наблюдений в 2014 году.

За климатические нормы приняты средние значения ОПА за период с 1979 по 2012 г. за исключением 1983-1984 и 1992-1993 гг., когда особое влияние на состояние атмосферы оказывали последствия крупных вулканических извержений. Нормы ОПА (средние за 30 лет) в городах выше норм фоновых станций на 6-11%.

Многолетнюю межгодовую изменчивость ОПА за весь период наблюдений иллюстрирует рис. 1.2.1.10, на котором представлены изменение (в %) нормированных аномалий ОПА на шести региональных фоновых станциях с начала 1970-х по 2020 г. включительно (рис. 1.2.1.10а) и среднегодовые значения ОПА на указанных станциях за первые 20 лет XXI века (рис. 1.2.1.10б).

Из рис. 1.2.1.10а следует, что весь период наблюдений за ОПА (1972-2020 гг.) можно разделить на три части:

1) начало 1970-х – 1993 гг. – состояние атмосферы определяют последствия мощных вулканических извержений – Фуэго (1974 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо и Хадсон (1991 г.);

2) середина 1990-х – конец 1990-х гг. – переходный период самоочищения атмосферы, сокращения промышленной активности в постперестроечные годы, снижения оптического замутнения атмосферы;

3) первое двадцатилетие XXI века (рис. 1.2.1.10б) – относительно спокойное состояние атмосферы. Нормированные аномалии в основном находятся ниже нормы. Исключение составляет станция Усть-Вымь (Республика Коми). Ее отличают максимальные отклонения нормированных аномалий ОПА (от 17 до –22%).

После 2000-го года среднегодовые значения ОПА на всех региональных фоновых станциях варьируют в диапазоне 0,2-0,3, опускаясь ниже лишь на самой чистой горной станции Шаджатмаз (рис. 1.2.1.10б). Средние уровни общего оптического замутнения атмосферы за 2000-2020 гг. не превышают 0,25.

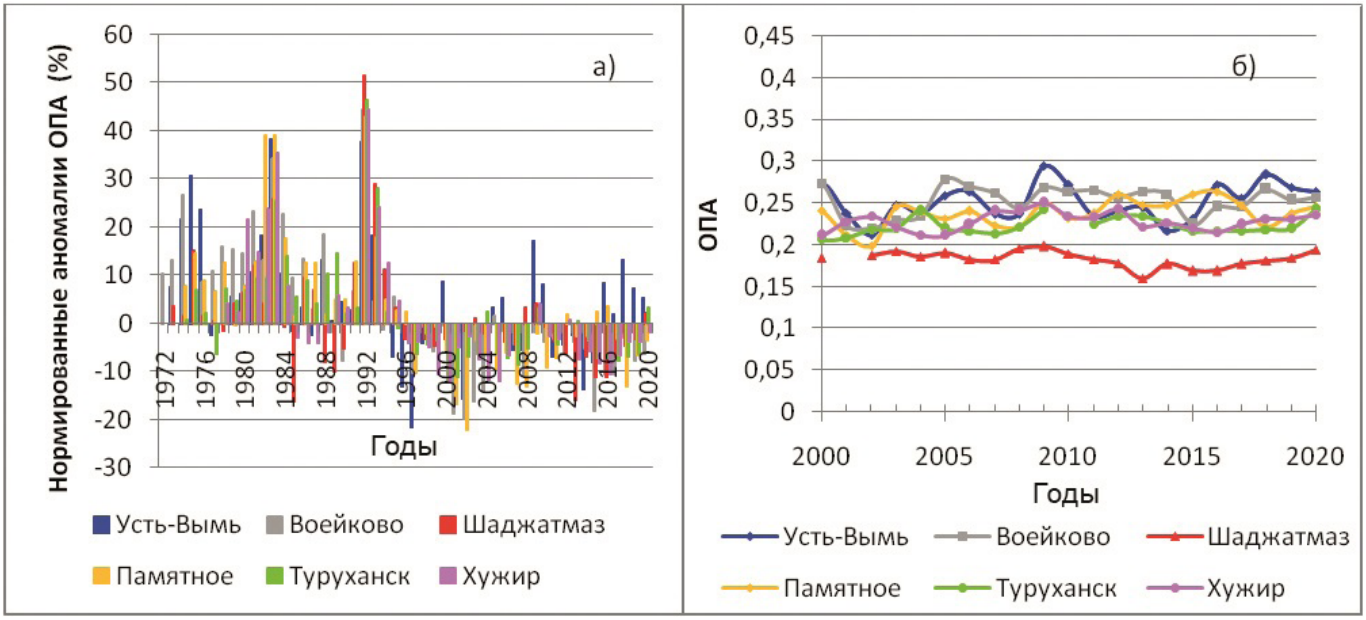



***Рис. 1.2.1.10*** *Изменение нормированных аномалий ОПА за весь период наблюдений (а) и среднегодовых значений ОПА после 2000 года (б)*

За первые 20 лет XXI века на региональных станциях фонового мониторинга статистически значимых трендов ОПА не зарегистрировано. Данные по ОПА постоянно обновляются и представляются в ежегодных «Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» (Русина, Боброва, 2021).

### 1.2.1.5 Облачность и радиационный режим

**Облачность**

Облачность является важнейшим регулятором солнечного и земного излучения и может обеспечивать формирование механизмов обратной связи, обусловленных антропогенными воздействиями. Однако несмотря на существование большого числа глобальных баз данных по облачности, основанных на разных источниках (Chernokulsky, Mokhov, 2012), к настоящему времени сохраняется большая степень неопределенности в оценке наблюдаемых изменений облачного покрова как глобального, так и регионального масштаба.

В Оценочных докладах для территории России (Росгидромет, 2008, 2014) основное внимание уделялось изучению региональных тенденций в изменении характеристик облачности по результатам наземных наблюдений во второй половине XX столетия. Пространственное осреднение характеристик общей облачности для крупных регионов выявило во второй половине XX столетия тенденцию к увеличению общей облачности, наиболее выраженную на АТР. Однако на рубеже XX-XXI веков сохранения этой тенденции не наблюдалось.

Более устойчивые изменения были обнаружены в отношении распределения разных видов и форм облачности по частоте их повторения (Хлебникова, Салль, 2009). Анализ современных данных, включающих информацию по 2020 г., выполненный по данным наземной актинометрической сети России, позволил подтвердить и отчасти детализировать сделанные ранее выводы (Хлебникова и др., 2022).

В последние десятилетия сохраняется тенденция увеличения частоты появления конвектив-

ной облачности, наиболее хорошо выраженная в переходные сезоны, особенно весной. В летний сезон практически на всей территории России диагностируется также увеличение частоты появления облаков верхнего яруса. В остальные сезоны относительное увеличение вклада облачности верхнего яруса отмечается в основном в южных районах страны (рис. 1.2.1.11).

Продолжается перераспределение вклада дождевой облачности разных типов, проявляющееся в росте доли кучево-дождевых облаков и уменьшении вклада слоисто-дождевой облачности (рис. 1.2.1.12). Эти выводы хорошо согласуются с оценками, полученными в отношении тенденции изменения осадков разного генезиса по данным метеорологических наблюдений в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2019).

Результаты, касающиеся изменения общей и нижней облачности (в баллах), в большей степени отражают региональную специфику. На европейской территории в весенний и летний сезоны доминирует тенденция к уменьшению общей облачности. В то же время четко проявляется увеличение этого показателя в Западной и Средней Сибири, а также на Дальнем Востоке, Приамурье и Приморье (Хлебникова и др., 2022).

Многолетние изменения нижней облачности ярко проявляются в переходные сезоны (рис. 1.2.1.13). При этом на ЕТР и АТР наблюдаются противоположные тенденции изменения. На азиатской территории отмечается хорошо выраженная тенденция к увеличению нижней облачности и весной, и осенью. В то же время на ЕТР в эти сезоны доминирует тенденция к уменьшению нижней облачности.

**Радиационный режим**

Антропогенное воздействие на климат сопровождается модификацией радиационных потоков в климатической системе. Увеличение выбросов парниковых газов приводит к усилению нисходящего длинноволнового излучения, составляющему по модельным оценкам в настоящее время около 2 Вт/м$^2$ за десятилетие. Эти оценки подтверждаются высокоточными измерениями теплового излучения, однако таких данных пока еще очень мало (Wild, 2016).

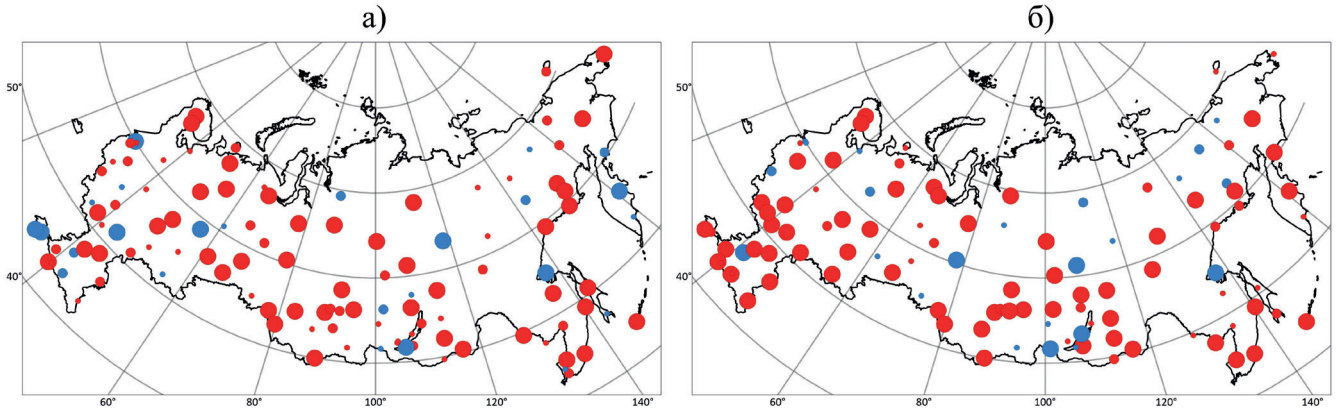



***Рис. 1.2.1.11*** *Изменение вклада различных форм облачности (в % от общего числа наблюдений с наличием облаков) на интервале 1976-2020 гг.*

*а) конвективная облачность (Cu, Cb); весна; б) облачность верхнего яруса (Ci, Cc, Cs); лето.*

*Здесь и далее крупными (средними) кружками выделены станции с трендом, значимым на уровне 5(10)%: красными – с положительным, синими – с отрицательным трендом.*

*Анализ трендов выполнен по методу Манна-Кендалла*

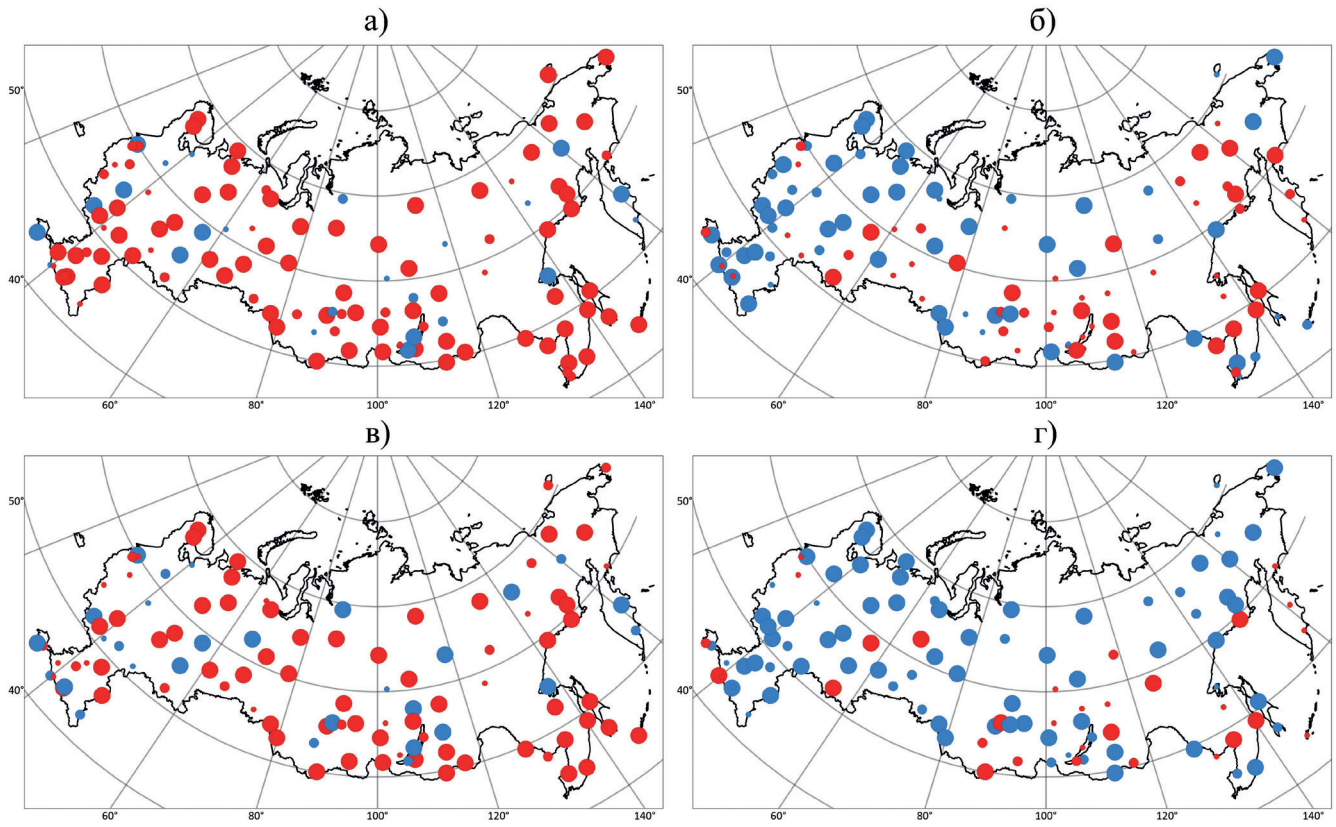



***Рис. 1.2.1.12*** *Изменение вклада (в % от общего числа наблюдений с наличием облаков) дождевой облачности различного генезиса: кучево-дождевой Cb (слева) и слоисто-дождевой Ns (справа) весной (а, б) и осенью (в, г) на интервале 1976-2020 гг.*

*Обозначения – см. рис. 1.2.1.11*

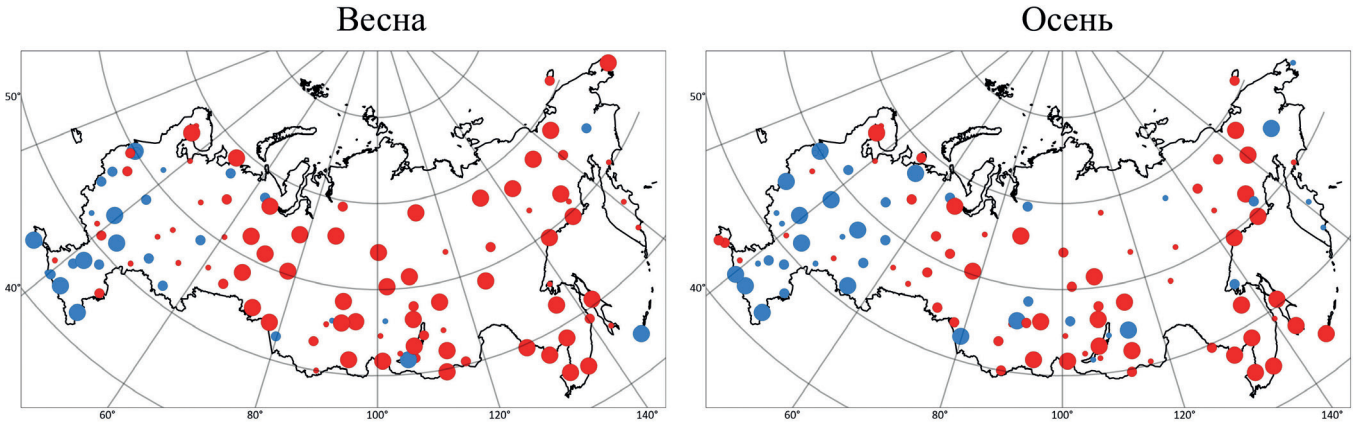



***Рис. 1.2.1.13*** *Изменение количества облаков нижнего яруса в весенний (слева) и осенний (справа) сезоны на интервале 1976-2020 гг.*

*Обозначения – см. рис. 1.2.1.11*

В контексте анализа изменений климата существенное значение имеют также междесятилетние колебания нисходящей коротковолновой солнечной радиации, регулярные наземные наблюдения за которой ведутся с начала XX века. По состоянию на 1.01.2021 г. актинометрическая сеть Росгидромета включает в себя около 100 станций с программами наблюдений, позволяющими осуществлять климатологический анализ коротковолновой радиации (прямой сол-

нечной, рассеянной, отраженной и суммарной), а также радиационного баланса подстилающей поверхности. В перспективе на модернизированной актинометрической сети Росгидромета можно будет анализировать климатические изменения длинноволнового излучения (нисходящего и восходящего). Соответствующие измерительные комплексы установлены на 22 станциях, однако в настоящее время объем накопленной информации еще недостаточен для обобщения.

Основная особенность глобальных многолетних изменений приходящей к земной поверхности солнечной радиации состоит в уменьшении поступающей солнечной радиации, начавшемся в 1950-х и продолжавшемся до конца 1980-х гг. (Wild, 2009, 2012). Это явление, получившее название global dimming, и последующее частичное восстановление прихода радиации (brightening) являются предметом многочисленных исследований (Sanchez-Lorenzo et al., 2015; Wild et al., 2017), выполненных в последнее десятилетие после выхода в свет Пятого оценочного доклада МГЭИК. Во многих работах обсуждаются возможные механизмы возникновения данного явления (Mateos et al., 2014; Wang et al., 2014; Wild, 2016). В настоящее время наиболее распространенной является точка зрения (Wild, 2016), что облачный покров эффективно модулирует изменения солнечной радиации на межгодовых масштабах, в то время как крупномасштабная долговременная тенденция связана с влиянием аэрозолей – как прямым, так и косвенным (Lohmann, Feiter, 2005). Такая интерпретация подтверждается оценками приходящей солнечной радиации для условий безоблачного неба в Центральной Европе, которые демонстрируют ключевую роль состава атмосферы (прежде всего аэрозолей) в возникновении выраженных междесятилетних вариаций приходящей радиации (Wild et al., 2021). Эти результаты согласуются с оценками аэрозольной оптической толщины атмосферы, полученными для территории России по данным актинометрических наблюдений (Хлебникова, Махоткина, 2014).

Глобальные особенности междесятилетних изменений солнечной радиации хорошо проявляются по данным наблюдений на российской актинометрической сети (Хлебникова, Махоткина, 2014; Хлебникова, Салль, 2014; Росгидромет, 2021; Горбаренко, 2016, 2019). Анализ сезонных аномалий прямой радиации, осредненных по территории России (рис. 1.2.1.14), демонстрирует единообразие многолетнего хода аномалий для различных сезонов, свидетельствующее о крупномасштабности воздействия, приведшего к пониженным значениям прямой радиации в последней четверти XX века на территории России. В начале XXI века регистрируемые аномалии близки к нулю и значительно отстоят от экстремально низких значений, достигнутых в начале 1990-х гг.

В последнее десятилетие XX столетия во всех крупных физико-географических районах России произошел возврат к значениям приходящей радиации, близким к норме. Анализ многолетних колебаний пространственно-осредненных аномалий годовых сумм прямой радиации (Росгидромет, 2021) показывает, что в начале XXI века значения, близкие к норме, наблюдаются практически на всей территории России. В большей степени, чем для других регионов, отклоняются от нормы годовые суммы прямой радиации на территории Средней Сибири (рис. 1.2.1.15), где в течение ряда лет регистрируются отрицательные аномалии. На ЕТР, в особенности в центральных и южных рай-

онах, сохраняется положительная тенденция в изменении прямой радиации. На фоне резкого снижения рассеянной радиации в начале 90-х годов XX века суммарная радиация на ЕТР проявляет слабую, но значимую тенденцию к повышению.

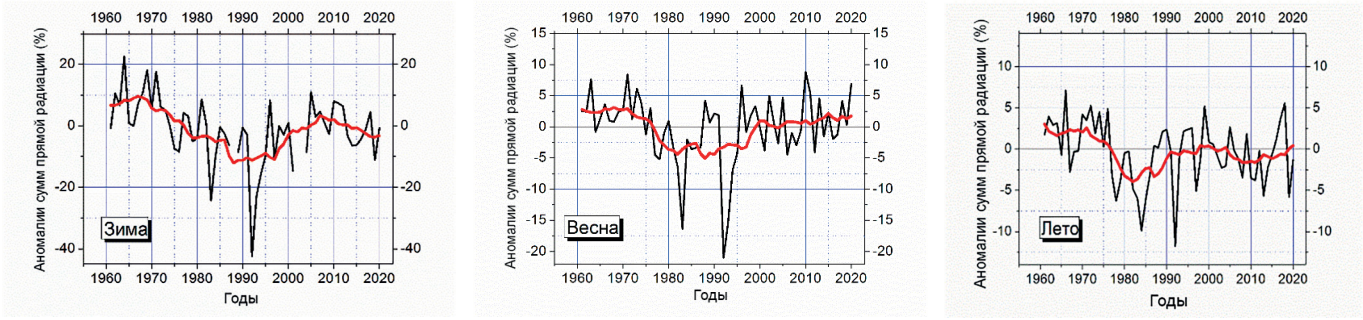



***Рис. 1.2.1.14*** *Аномалии (в процентах от среднего за 1961-1990 гг.) сезонных сумм прямой радиации, приходящей к земной поверхности, осредненные по территории Российской Федерации. 1961-2020 гг. (Росгидромет, 2021).*

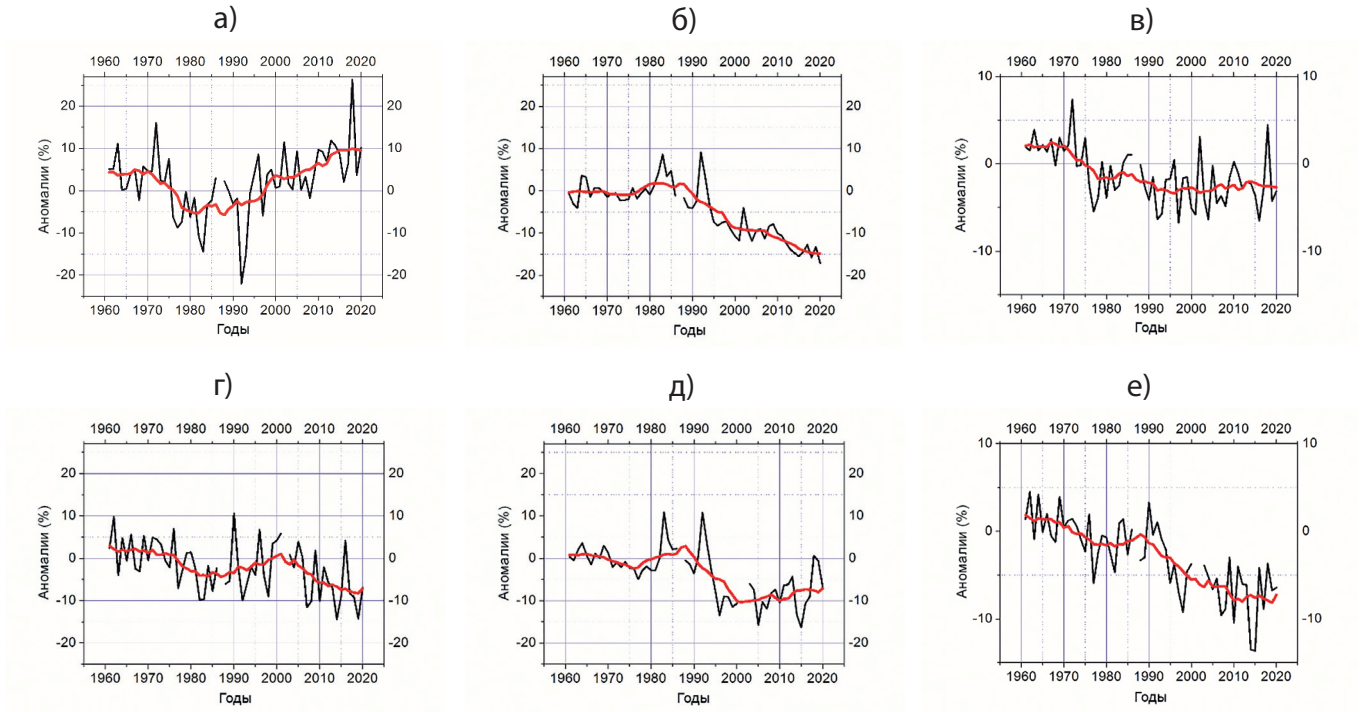



***Рис. 1.2.1.15*** *Регионально-осредненные аномалии (в процентах от среднего за 1961-1990 гг.) годовых сумм прямой (а, г), рассеянной (б, д) и суммарной радиации (в, е)*

*Сверху – ЕТР, снизу – Средняя Сибирь. (Хлебникова и др., 2022)*

### 1.2.1.6 Атмосферная циркуляция

Региональные особенности климата и внутренняя климатическая изменчивость определяются атмосферной циркуляцией и взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью. По-видимому, географические особенности наблюдаемого антропогенного потепления также могут быть связаны с основными структурами («модами») крупномасштабной циркуляции («нелинейная парадигма Палмера»: Palmer, 1999; Corti et al., 1999; также Hasselmann, 1999). Одна из важнейших глобальных мод COWL («Cold Ocean-Warm Land»,

Wallace et al. 1996; Corti et al, 1999 и др.) выражается в том, что потепление у поверхности суши происходит быстрее, чем у поверхности океана. Однако в этом вопросе нет достаточной определенности, поскольку нет надежных свидетельств изменения статистики мод при потеплении. По результатам климатического моделирования исследовались изменения статистики Североатлантического колебания (САК): было показано, что некоторые модели не демонстрируют монотонных изменений, другие указывают на возможный сдвиг в сторону положительной фазы. В (IPCC, 2013) указывается на положительный отклик САК на антропогенный форсинг (основная ссылка: Gillett, Fyfe, 2013); однако предлагается относиться к этому выводу с большой осторожностью: с одной стороны, по той же причине – значительного расхождения результатов разных моделей, а с другой – из-за малости отклика по отношению к естественной изменчивости, что делает результаты ненадежными. Отмеченный еще в 3-м и 4-м Оценочных докладах МГЭИК (IPCC, 2001, 2007; из недавних работ Попова, 2018; Бардин и др., 2015б) вклад роста положительной фазы САК в потепление зим в Северной Евразии связан с долгопериодным колебанием климата Северной Атлантики: смена фазы этого колебания в 1990-е гг. сопровождалась почти повсеместным похолоданием зим на территории Российской Федерации вплоть до 2010 года, когда новый рост САК привел к потеплению вплоть до рекордного значения зимы 2019/20 гг. В целом в контексте изменения климата основной интерес представляет именно круг вопросов, связанный с влиянием атмосферной циркуляции на климатическую изменчивость температуры воздуха и атмосферных осадков – включая изменения как средних сезонных величин, так и экстремальных значений.

**Полушарные структуры**

Зональный перенос является самой крупной структурой полушарной атмосферной циркуляции в умеренных широтах. Изменения зонального переноса в атлантико-европейском секторе в значительной мере определяют колебания климата Европы и Северной Евразии, в особенности в центральные сезоны, когда контраст температуры у поверхности океана и суши велик. Долгопериодная изменчивость зонального переноса оказывается тесно связанной с ведущей дипольной модой атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой – Североатлантическим колебанием (рис. 1.2.1.16).

Изменения зонального переноса согласуются с данными синоптической классификации Б. Л. Дзердзеевского (Кононова, 2018): в период с 1960-х до середины 1990-х гг. наблюдается убывание повторяемости группы процессов блокирования, затем ее рост до 2010 г. и вновь убывание.

Рост западного переноса во второй половине XX века усилил зимнее потепление в Северной Евразии (Попова, 2018; Бардин и др., 2015б). Ослабление зонального переноса при сдвиге САК в сторону отрицательной фазы в период между серединой 1990-х и 2010 гг. зимой сопровождалось усилением антициклонической активности на ЕТР и южной части Западной Сибири (Бардин и др., 2019) и способствовало замедлению потепления на ЕТР и похолоданию в восточных регионах России. При росте САК и западного переноса после 2010 г. потепление возобновилось, вплоть до рекордных значений температуры в 2020 г. (Росгидромет, 2020).

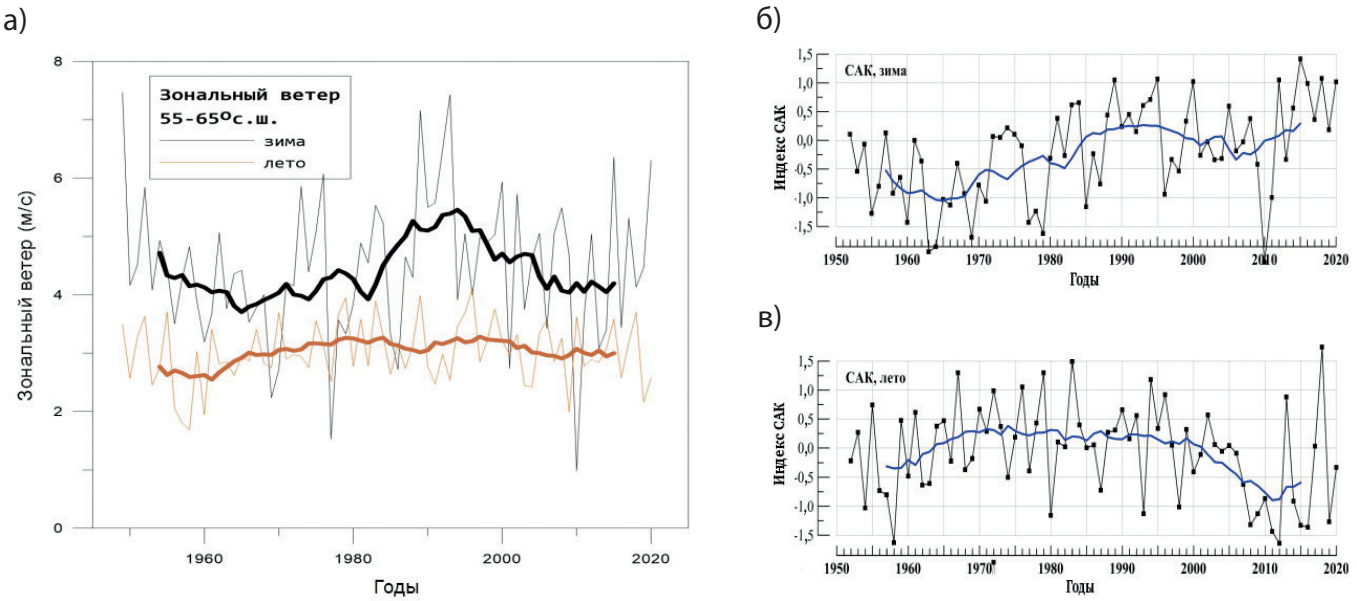



***Рис. 1.2.1.16*** *Зональный ветер (м/с) на поверхности 700 гПа в поясе 55-65°с. ш.(а) и индекс САК в зимний (б) и летний (в) сезоны:*

*(а) – данные: реанализ NCEP/NCAR CDAS1 (Kalnay et al., 1996);*

*(б) и (в) – по (Barnston, Livezey 1987; https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml)*

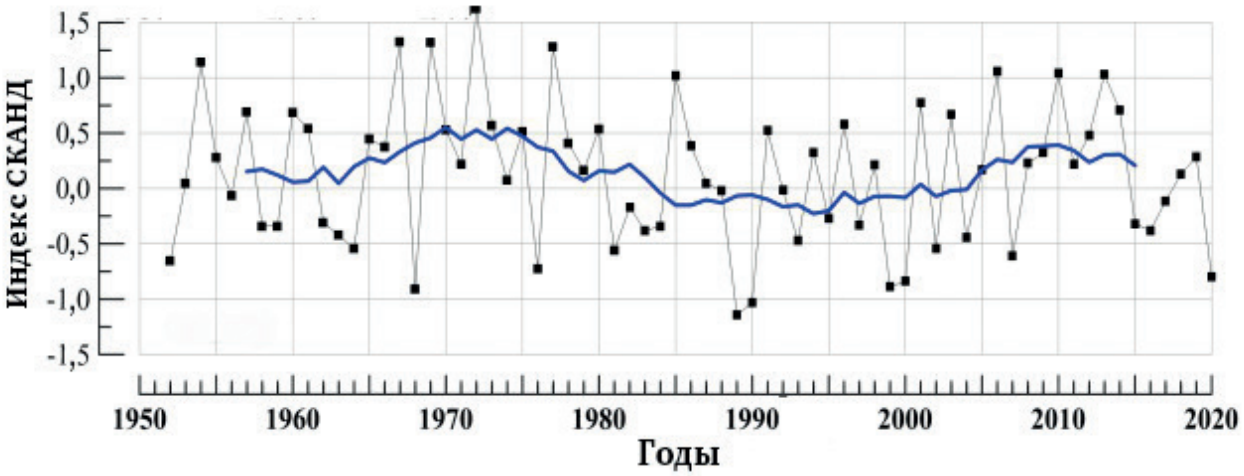
САК оказывает существенное влияние на статистику экстремальных температурных (погодных) режимов в России (Бардин, Платова, 2019), в особенности зимой, когда положительная фаза САК связана с ослаблением экстремумов холода (т.е. уменьшением числа аномально холодных дней, длительности волн холода) практически для всей территории (значимый вклад отмечен везде на ЕТР, кроме Северо-Кавказского региона, и в южной части АТР). Для экстремумов тепла значимая положительная связь с САК наблюдается на западе ЕТР, Урале и востоке Западной Сибири.

**Моды циркуляции атлантико-европейского сектора. Скандинавская мода**

Изменения скандинавской моды (СКАНД) после 1970 г. происходят в противофазе с САК. В работе (Бардин и др., 2019) показано, что зимой в положительной фазе СКАНД центр блокирующей антициклонической активности смещается с востока Западной Сибири на восток ЕТР. Связанные с такой локализацией блокингов аномалии температуры отрицательны и ниже –2 °С почти везде на АТР (кроме дальнего Северо-Востока) и достигают –5 °С в Иркутской области. По-видимому, именно таким образом рост СКАНД после 1995 г. (рис. 1.2.1.17) дает значительный вклад в похолодание зим 1995-2010 гг. на АТР (Бардин и др., 2019).

Убывание СКАНД после 2013 г. содействовало повышению температуры на территории Российской Федерации, наблюдающемуся после 2010 г. (хотя и в меньшей степени, чем рост САК). Непосредственная оценка связи СКАНД и статистики экстремумов температуры зимой указывает для положительной фазы на повышение числа аномально холодных дней на юге страны, а также на востоке и в Западной Сибири. Показатели экстремумов тепла в положительной фазе уменьшаются на юге, в Западной и Средней Сибири. Летом отмечается в положительной фазе рост показателей экстремумов тепла на севере и в центре ЕТР (Бардин, Платова, 2019).

а)




б)

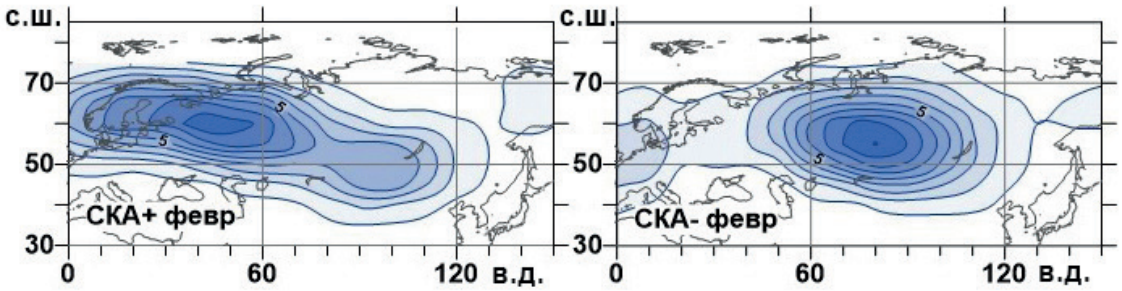
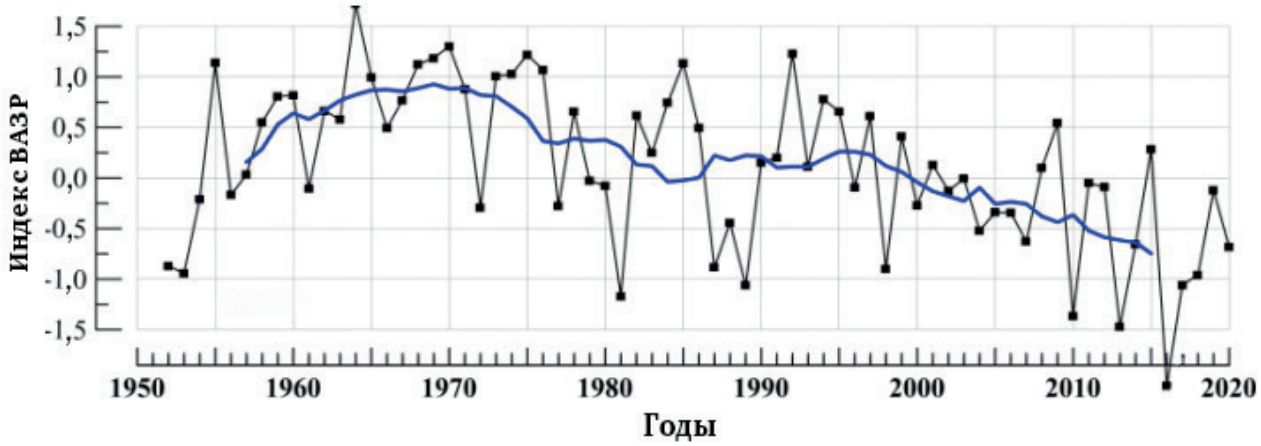



***Рис. 1.2.1.17*** *Индекс СКАНД (Barnston, Livezey, 1987; https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml), зимний сезон (а); повторяемость (дней/месяц) эпизодов блокирования в феврале при положительной и отрицательной фазах СКАНД – 15% максимальных по модулю положительных и отрицательных значений индекса за 1951-2017 гг. (б)*

Мода Восточная Атлантика – Западная Россия (ВАЗР) представляет собой зонально расположенный диполь с отрицательной аномалией давления на ЕТР в положительной фазе (соответственно, положительной в отрицательной фазе) и аномалией противоположного знака в Восточной Атлантике. Летом с отрицательной фазой этой моды связано резкое изменение локализации и повторяемости эпизодов блокирующей антициклонической циркуляции: смещение на восток ЕТР и рост порядка трех раз (рис. 1.2.1.18) и, соответственно, повышенное число и интенсивность эпизодов экстремального тепла и дефицит осадков с возникновением сильной засухи на ЕТР (Черенкова и др., 2020). В большинстве случаев выраженная отрицательная фаза ВАЗР ассоциируется с повышенной температурой Северной Атлантики. Индекс ВАЗР постоянно убывает после середины 1990-х гг., и три максимальных по величине отрицательных значения наблюдались в 2010, 2013 и 2016 гг. (первое, пятое и второе среди наиболее теплых лет ЕТР).

а)




б)

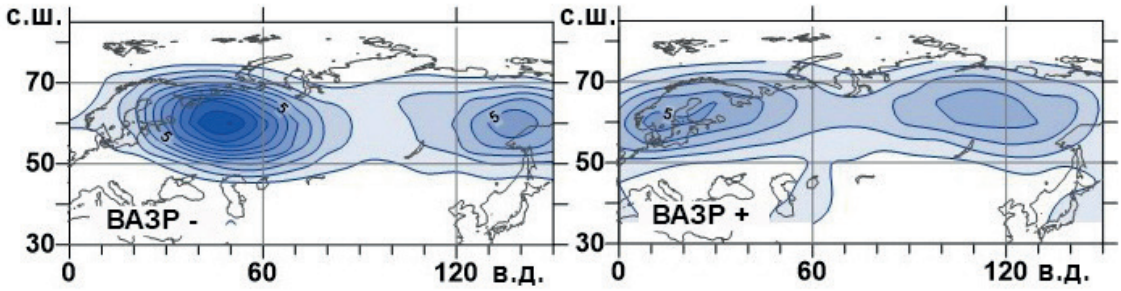



***Рис. 1.2.1.18*** *Индекс ВАЗР (Barnston, Livezey, 1987), летний сезон (а); повторяемость эпизодов блокирования (дней/месяц) в летние месяцы при положительной и отрицательной фазах ВАЗР – 10% максимальных по модулю положительных и отрицательных значений индекса за 1950-2020 гг. (б)*

**Региональная циклоническая и антициклоническая активность**

На территории Российской Федерации в период потепления (с середины 1970-х гг.) не наблюдается заметных трендов циклонической активности (Бардин и др., 2021). Во всех регионах имеется выраженная междесятилетняя изменчивость (рис. 1.2.1.19).

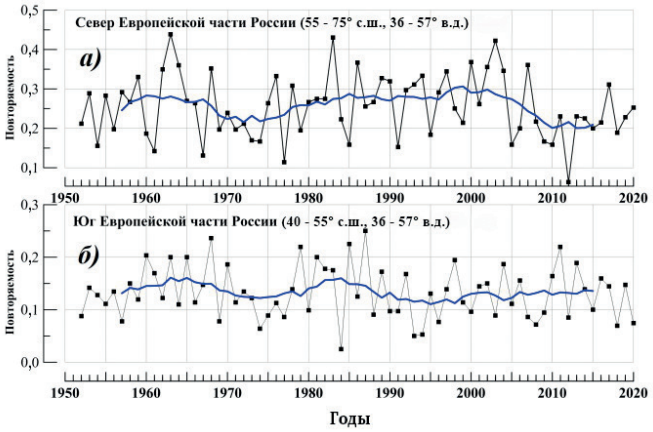
Региональная синоптическая вихревая активность существенно зависит от фаз определенных мод крупномасштабной циркуляции. Так, в положительной фазе САК зимой циклоническая активность заметно возрастает над севером Атлантики: основные траектории циклонов направлены от Исландии к побережью Скандинавии, на север ЕТР и Западной Сибири, а в отрицательной фазе активность на севере Атлантики ослабевает, а основные траектории направлены вдоль побережья Северной Америки до Ньюфаундленда и затем зонально: возрастает активность в Западной Европе, в Средиземноморском и Черноморском регионах, а также на севере, вдоль побережья Баренцева моря и в Западной Сибири (Бардин, Полонский, 2005; Бардин и др., 2015а).

Наибольшее влияние на изменения циклонической активности на ЕТР, особенно в северной части, зимой оказывает СКАНД: с очень низкой повторяемостью циклонов в положительной фазе и высокой – в отрицательной (Бардин и др., 2015а). Долгопериодные изменения циклонической активности в северной половине ЕТР определяются в первую очередь этой

модой (Бардин и др., 2021), несколько меньше вклад САК и восточно-атлантической моды (все вклады значимы на уровне 0,1%).

Напротив, в повторяемости антициклонов наблюдается летом на ЕТР тенденция роста с начала 1990-х гг., согласующаяся с повышенной антициклонической активностью в отрицательной фазе ВАЗР (Бардин и др., 2019) и убыванием ВАЗР в последние десятилетия (рис. 1.2.1.18). Поскольку отрицательная фаза ВАЗР ассоциируется с повышенной температурой Северной Атлантики (Черенкова и др., 2020), можно ожидать сохранения этой тенденции при потеплении, с повышением риска засухи на ЕТР (см. также выше).

*циклоны*




*антициклоны*

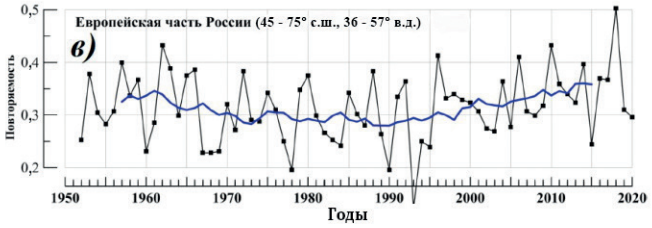



***Рис. 1.2.1.19*** *Изменения повторяемости циклонов (доля дней с центром циклона над областью за сезон) в северной (а) и южной (б) частях ЕТР зимой; то же для антициклонов над ЕТР летом (в)*

**Приземный ветер**

По данным 1412 метеорологических станций на территории Российской Федерации получены оценки линейного тренда приземного ветра (Булыгина и др., 2020) за период 1977-2019 гг. (рис. 1.2.1.20); выбор периода вызван нарушением однородности ряда: с 1969 г. анеморумбометр М-63 становится основным ветроизмерительным прибором; но старые приборы на ряде станций продолжали работу до 1976 г. Преобладает тенденция уменьшения средней скорости ветра в основном в пределах –1…–0,1 м/с за 10 лет. Рост скорости ветра (до 0,5 м/с за 10 лет) отмечается на юге АТР во все сезоны; на Чукотке, Южном Урале, Северном Кавказе – весной, летом и осенью. Для всех квазиоднородных районов (Алисов, 1956) во все сезоны средние скорости ветра убывают (линейный тренд статистически значим на уровне 5%, исключение составляют Чукотка и север Камчатки, а также Алтай и Саяны весной и летом).

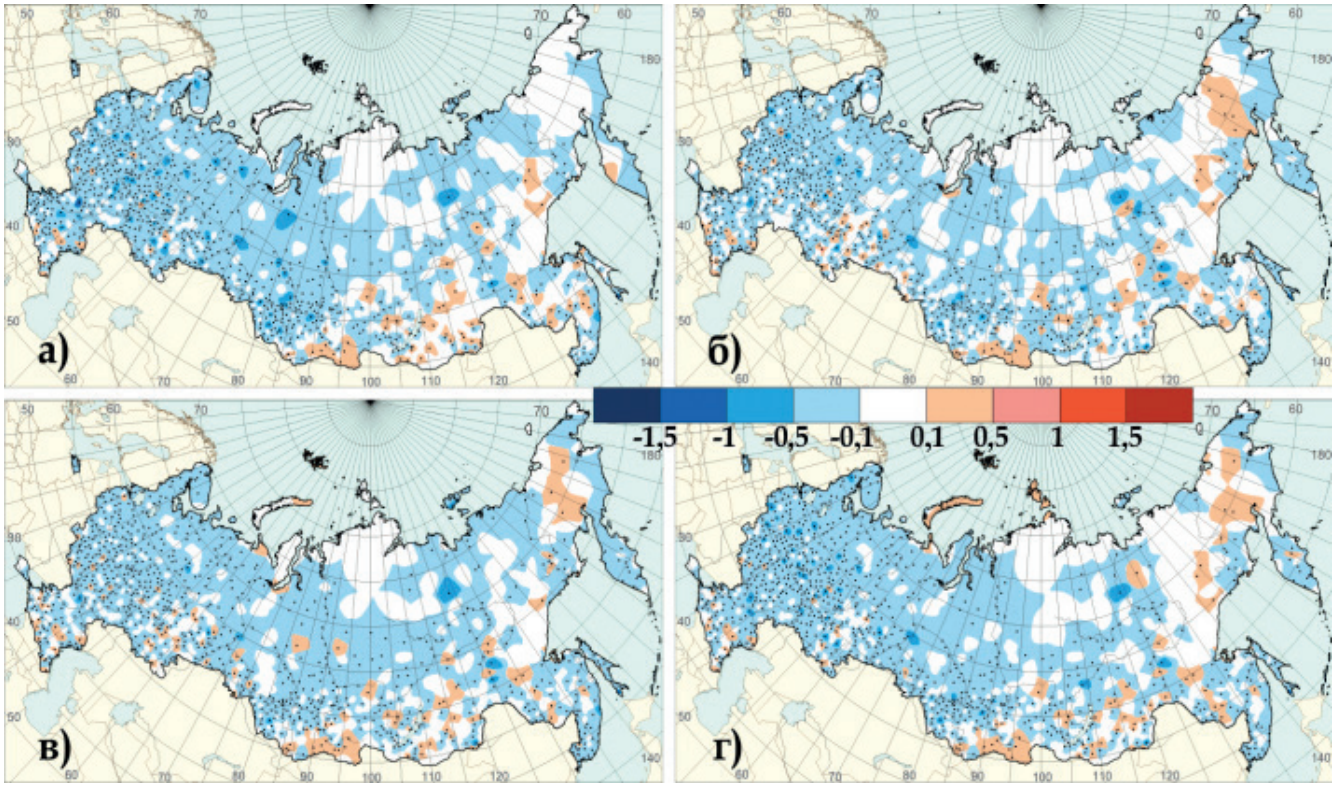



**Рисунок 1.2.1.20** *Распределение локальных коэффициентов линейного тренда средней скорости приземного ветра (м/с за 10 лет) на территории России за период 1977-2019 гг. зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (г)*

*Точками показаны станции, где тренд значим на уровне 5%*

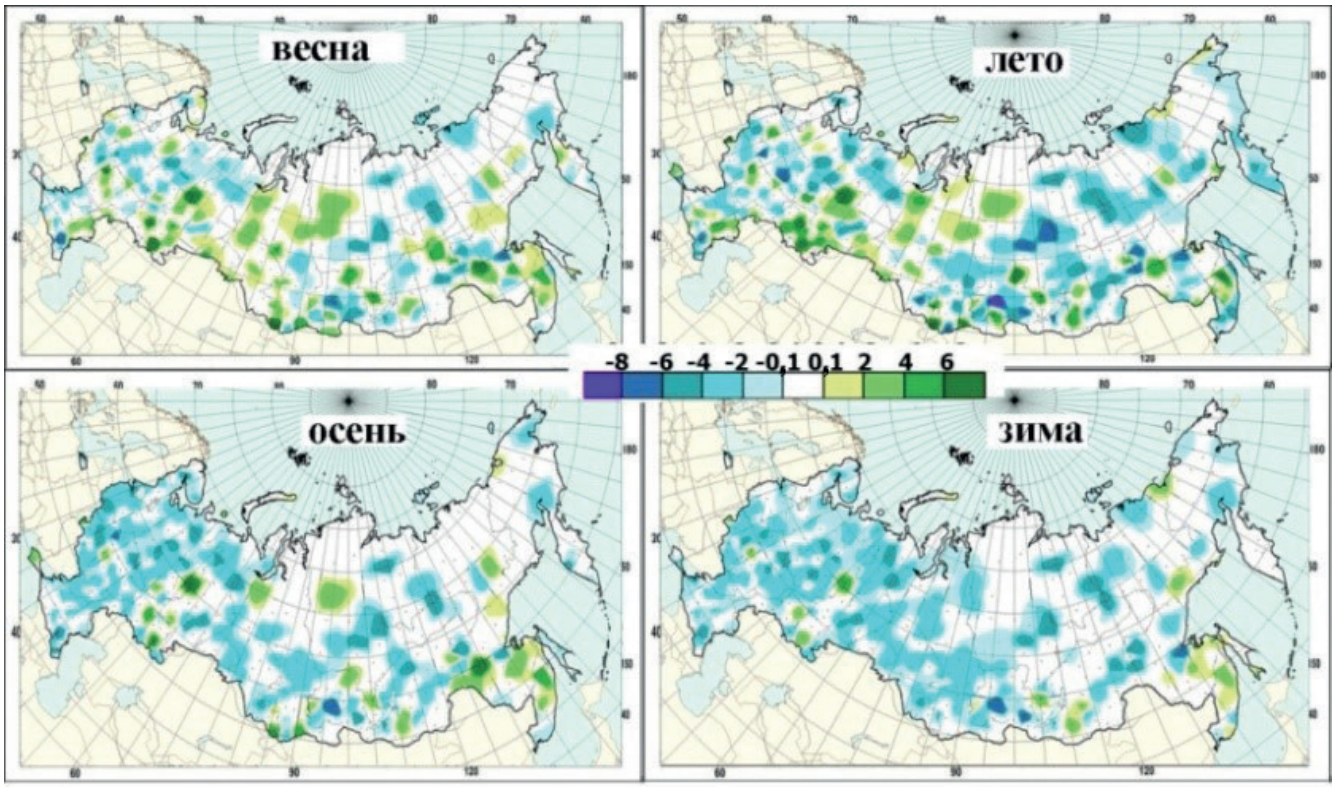



**Рис. 1.2.1.21** *Коэффициенты линейного тренда в рядах числа дней с сильным (более 15 м/с) ветром (дни/10 лет) за 1976-2019 гг.*

На большей части территории Российской Федерации в течение года число дней с сильным ветром (больше 15 м/с) убывает. Увеличение повторяемости сильного ветра во все сезоны наблюдается в Приморье, на Урале и в отдельных районах юга Сибири; особенно выделяется рост повторяемости весной и летом в Западной и Средней Сибири, Нижнем Поволжье (рис. 1.2.1.21).

### 1.2.1.7 Почва и криосфера суши

**Почва**

Приведенные оценки изменения минимальной за год температуры почвы получены по суточным данным на 466 метеорологических станциях России (Шерстюков, 2012; Шерстюков, Шерстюков, 2015).

Распределение трендов минимальной температуры почвы на глубинах до 320 см (Росгидромет, 2021) показано на рис. 1.2.1.22. Следует иметь в виду, что имеющаяся сеть станций в зоне севернее 65° с.ш. к востоку от Енисея (80-90° в.д.) редка, поэтому к выводам для этой зоны следует относиться с осторожностью.

На глубине 80 см (рис. 1.2.1.22а) тренды минимальной за год температуры почвы преимущественно положительные на большей части территории России. Повышенные значения трендов 0,4-0,8 °С/10 лет наблюдаются в зоне многолетней мерзлоты. Статистически достоверные (с вероятностью 95%) положительные тренды охватывают южную половину Средней Сибири, а также наблюдаются на севере Восточной Сибири и Дальнего Востока. В этих районах преобладают тренды 0,2-0,8 °С/10 лет. Исключением являются долины рек Яна и Алдан с отрицательными трендами около –0,4 °С/10 лет, и еще некоторые отдельные пункты: все отрицательные тренды статистически недостоверны. В южной части ЕТР потепление составило 0,2-0,4 °С/10 лет, а на остальной части ЕТР и в Западной Сибири преобладают слабые положительные тренды.

На глубине 160 см (рис. 1.2.1.22б) по всей России преобладают положительные тренды, но область повышенных значений (>0,4 °С/10 лет) в высоких широтах смещена к востоку. Положительные тренды 0,2-0,8 °С/10 лет охватывают север Восточной Сибири и Дальнего Востока. Статистически достоверное (с вероятностью 95%) потепление (> 0,2 °С/10 лет) также наблюдается в южной половине ЕТР и в Средней Сибири. На остальной части ЕТР и в Западной Сибири слабые положительные тренды. Отрицательные тренды не наблюдаются.

На глубине 320 см (рис. 1.2.1.22в) тренды положительные на всей территории России, повышенные значения (> 0,4 °С/10 лет) местами встречаются на северной половине Средней и Восточной Сибири. Статистически достоверные (с вероятностью 95%) тренды >0,2 °С/10 лет наблюдаются в южной половине ЕТР, на севере Средней и в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, а также в Прибайкалье и Забайкалье.

Можно сделать вывод, что в 1976-2020 гг. тенденция повышения минимальной температуры почвы ослабевала с глубиной. На большей части территории России на всех глубинах до 320 см изменение температуры составляет менее 0,4 °С/10 лет. Наибольшее и статистически значимое повышение минимальной температуры почвы на глубине 320 см наблюдается на севере Сибири, на полуострове Таймыр, в устьях рек Енисей и Лена, а также в долине реки Яна.

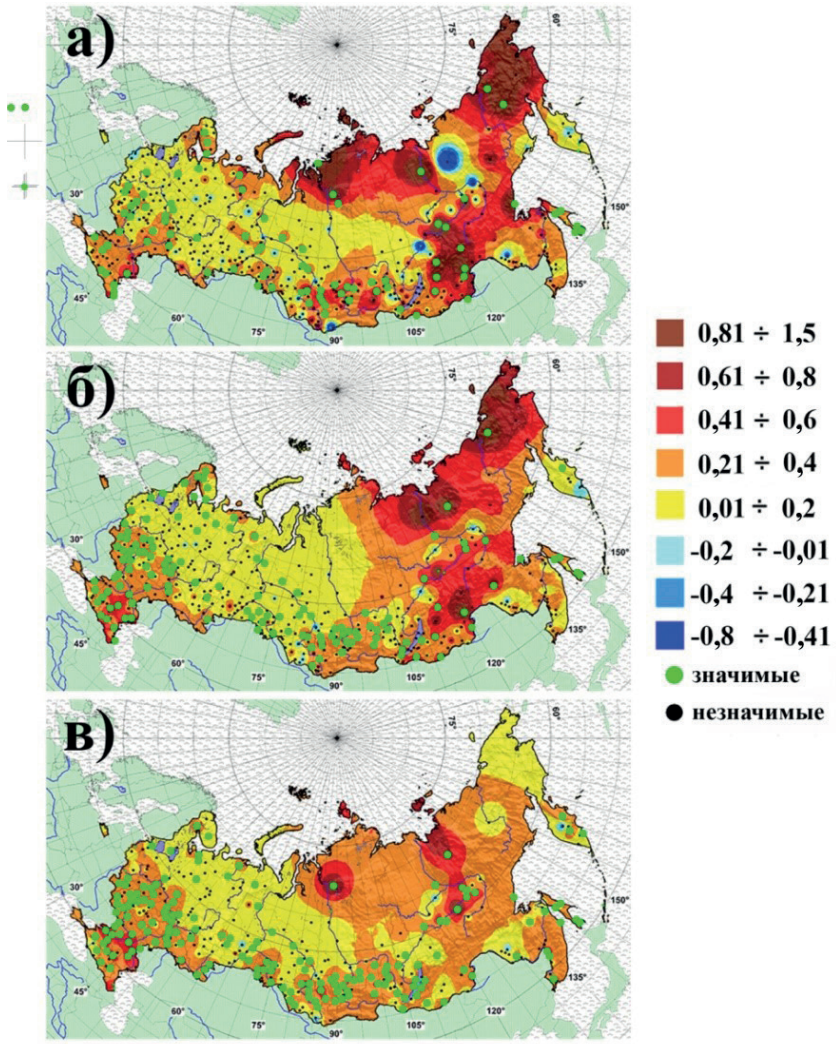



***Рис. 1.2.1.22*** *Тренды минимальной за год температуры почвы (°С/10 лет) на глубинах: 80 см (а), 160 см (б), 320 см (в) за период 1976-2020 гг. Уровень значимости: P = 0,05*

**Ледники**

Измерения площади и длины участков сократившихся долинных ледников Центрального Кавказа проводились на аэрофотоснимках середины XX века и космических снимках Sentinel-2 2015-2020 гг. (Беккиев и др., 2021; Atakuyev et al., 2016; Kalov et al., 2018). Границы замороженных ледников проводились с учетом выявления движения на основе использования анимаций космоснимков. Реакция ледников на изменения климата была разнообразной, вследствие различий в параметрах вмещающего рельефа, морфологии, высоте и параметрах области питания и других причин. Максимальная убыль площади наблюдалась у ледников Джикиуганкез на севере Эльбруса (8,12 км$^2$) и Большой Азау (6,35 км$^2$), имеющих максимальную ширину языков в области абляции (до 3,0 и 4,5 км). Площадь оледенения Эльбруса уменьшилась на 26,4 км$^2$. Темпы деградации ряда ледников Эльбруса в 2015-2020 гг. в сравнении с предыдущим периодом с конца 1950-х возросли до пяти раз (Золотарев, Харьковец, 2012; Беккиев и др., 2021). На расстояние более 3 км отступили ледники Дых-Су и Шаурту, испытавшие распад на несколько отдельных ледников. В среднем площадь долинных ледников сократилась на 12,2% (от 1-2 до 40%).

### 1.2.1.8 Экстремальность климата

В этом разделе под «экстремальностью климата» будет, как правило, пониматься статистика экстремальных (т.е. значительно отличающихся от «нормы») значений климатических переменных, а под изменением экстремальности – изменения этой статистики, оцененной для различных частей (длительностью от сезона до нескольких десятилетий) временного ряда наблюдений. В некоторых случаях в качестве экстремальных рассматриваются редкие явления с потенциально значительными негативными последствиями (например, смерчи) без определения пороговых значений.

В случае глобального потепления поводом для изучения изменения экстремумов температуры является простое соображение о том, что изменение средних при примерном сохранении формы распределения сопровождается сходным изменением квантилей распределения. Однако указанное условие не обязательно выполняется даже для температуры: в отдельных регионах экстремальные температуры преимущественно связаны с определенными режимами атмосферной циркуляции, изменения статистики которых при потеплении далеко не очевидны. В случае со статистикой осадков ситуация еще сложнее, т.к. здесь средние величины непосредственно связаны с формой распределения (и параметром масштаба). Априори неясно, должно ли при потеплении изменяться количество осадков (скажем, за сезон), однако имеются основания считать, что вследствие увеличения влагосодержания атмосферы и уменьшения вертикальной устойчивости, может расти повторяемость сильных (преимущественно ливневых) осадков. Анализ рядов наблюдений подтверждает этот вывод для многих регионов (IPCC, 2013; Золина, Булыгина, 2016). Те же соображения позволяют предположить рост числа таких явлений, как, например, смерчи и др.; но надежную статистику по данным наблюдений получить затруднительно.

**Температура воздуха**

Показатели сезонного числа экстремумов холода (дней с температурой ниже 5-го и 10-го процентилей: ND5, ND10) и тепла (ND90, ND95) оценивались с использованием выборки 367 станций, для которых наличие данных позволяло получить тренды за 1976-2020 гг., из архива суточных данных ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., 2015б). Изменения в среднем по крупным регионам Российской Федерации (ЕТР, АТР, федеральным округам) соответствуют общей тенденции потепления (рис. 1.2.1.23).

Зимние изменения экстремумов обоих знаков (положительных и отрицательных, т.е. выше 90 (95)% и ниже 10 (5)%) происходят значительно медленнее летних. Это связано со значительным влиянием зимой фаз ведущих циркуляционных мод (в первую очередь – САК и СКАНД) на сезонную повторяемость экстремумов и с наличием долгопериодных (несколько десятилетий) изменений этих мод (Бардин, Платова, 2019): в результате на ЕТР убывание числа холодных дней после 1980 года очень слабо, а на АТР прекращается в середине 1990-х гг., и даже наблюдается небольшой рост (рис. 1.2.1.23).

Для теплых дней эти колебания очевидны зимой на АТР и не наблюдаются на ЕТР ни летом, ни зимой. Летом исключительно быстро растет число экстремумов тепла в южных регионах ЕТР, особенно в ЮФО (4,7 дня за десятилетие).

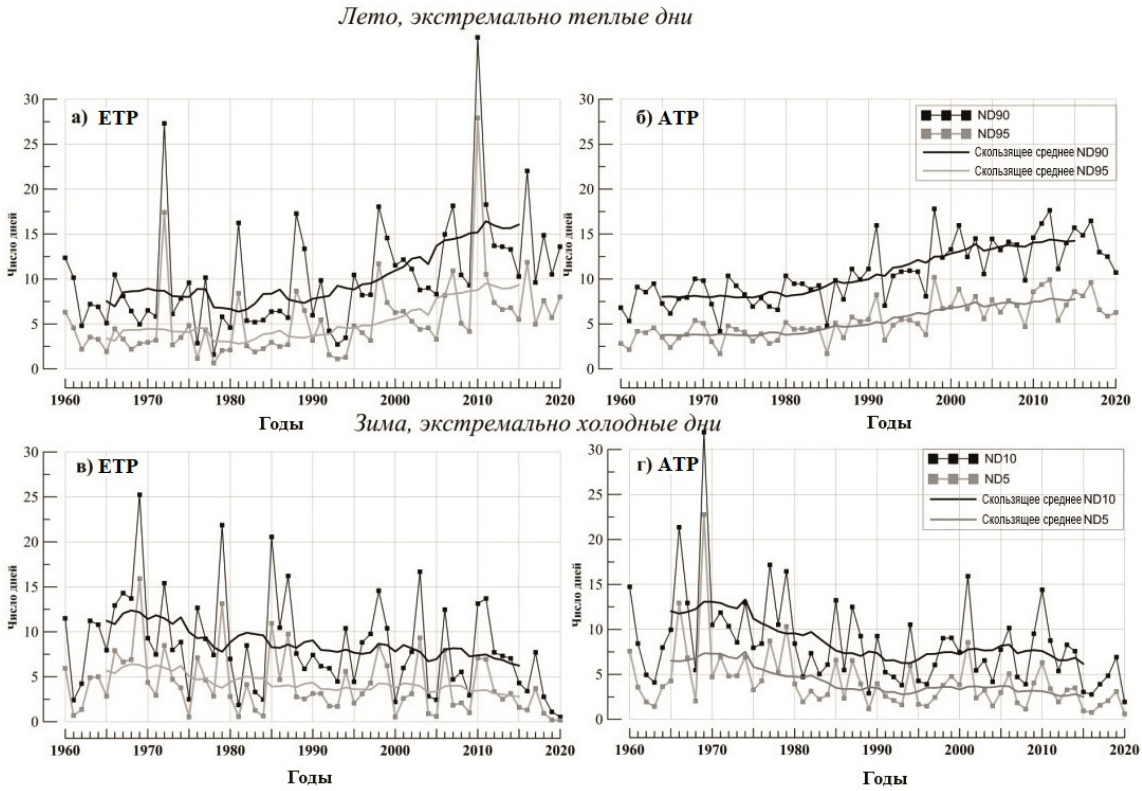



***Рис. 1.2.1.23*** *Изменение числа экстремально теплых дней ND90, ND95 летнего сезона в среднем по ЕТР (а), АТР (б), и холодных дней ND10, ND5 зимнего сезона: ЕТР (в), АТР (г); 1960-2020 гг.*

*Черные точки и линии – ND90, серые – ND95. Линиями показано 11-летнее скользящее среднее*

Медленные изменения числа экстремумов сопровождаются сильными всплесками в отдельные «пиковые» сезоны, которые объясняются определенными фазами циркуляционных мод и их сочетанием. Зимой, когда вклад крупномасштабной циркуляции силен, такие пики наблюдаются как на ЕТР, так и на АТР; летом же играют роль почти исключительно вклад мод ВАЗР (в отрицательной фазе) и, более ограниченно по территории, положительная фаза СКАНД (Бардин, Платова, 2019; Бардин и др., 2020). Обе моды в указанных фазах летом увеличивают сезонную продолжительность стационарных антициклонических образований на ЕТР: ВАЗР в восточной части (примерно втрое), а СКАНД несколько меньше на северо-западе, что и приводит к возникновению пиков числа жарких дней.

На замедление «смягчения» экстремумов холода после середины 1990-х гг. указывает увеличение числа холодных дней в центральных областях ЕТР и на юге Сибири (на три дня и более) (Виноградова, 2018), а также снижение минимальной температуры в волнах холода в центре и на юге ЕТР (на 2-4 градуса), на юге Западной Сибири и в Прибайкалье (на 6-8 градусов) в 2001-2010 гг. по сравнению с 1991-2000 гг. Эти результаты согласуются с выводами об увеличении повторяемости сильных морозов на большинстве станций юга Западной Сибири (Волкова и др., 2019), и для Западной Сибири в целом (Харюткина и др., 2019).

Сравнение характеристик волн тепла (непрерывных периодов с температурой выше 32 °С в течение трех дней подряд и более) в мае – сентябре на ЕТР для двух пятилетних периодов 2001-2005 гг. и 2006-2010 гг. (Виноградова, 2014) показало, что во второй период происходит увеличение максимальной

продолжительности и числа волн тепла, особенно в Центрально-Черноземных областях, в Поволжье и на юге ЕТР. Отмечается продвижение на север непрерывных эпизодов такой жаркой погоды, что связано с блокированием западного переноса и со смещением к северу климатического полярного фронта и адвекцией тропического воздуха в более северные районы.

**Географическое распределение трендов**

**Экстремумы холода**

Основные географические особенности изменений, отмеченные во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) для 1976-2012 гг., сохраняются и соответствуют распределению трендов среднесезонных температур. При этом зимой замедлилось уменьшение числа аномально холодных дней (ND5) на юге ЕТР и в некоторых регионах АТР (центр Западной Сибири, Якутия, Приамурье). Область роста ND5 в ПФО исчезла. На юге Западной Сибири и в Забайкалье области роста сохранились. Ускорилось уменьшение ND5 в северной части ЕТР. Весной замедлилось уменьшение ND5 в северной части ЕТР и несколько ускорилось в Западной Сибири. Появилась область роста на побережье моря Лаптевых.

Осенью сохраняется область роста на юге Западной Сибири. Географическое распределение трендов числа аномально холодных дней сходно с распределением по территории среднесезонных температур (Росгидромет 2020, рис. 1.2.1.24а); однако неясны причины наличия на ЕТР области роста температуры весной и слабого роста – зимой.

**Экстремумы тепла**

В целом рост числа аномально теплых дней (ND95) усилился по сравнению с оценками предыдущего периода (Росгидромет, 2014) – в основном за счет исчезновения крупных областей отрицательных трендов, которые для периода 1976-2010 гг. наблюдались на АТР для всех сезонов, кроме лета. Сохранились такие сравнительно небольшие области лишь зимой в центре Средней Сибири, на Кольском п-ове и побережье Баренцева моря (рис. 1.2.1.24б). Исчезла область значительного убывания числа экстремально теплых дней зимой на Чукотке и Камчатке; весной в Средней Сибири и на Таймыре; осенью в Якутии. Для периода 1976-2020 гг. летом очень значительно увеличились скорости роста на юге ЕТР (более 1,5 дня за десятилетие); весной обширная полоса с такими же значениями тренда сформировалась на ЕТР к северу от 60° с. ш.

Географическое распределение трендов числа аномально теплых дней соответствует распределению трендов среднесезонных температур (рис. 1.6 в Росгидромет, 2021; раздел 1.2.1.2 настоящего Доклада), а его изменения по сравнению с более ранним периодом – изменениям трендов средних (ср. (Росгидромет, 2014), рис. 1.2.9). Несколько неожиданна область уменьшения ND95 зимой на севере Иркутской области – юге Якутии, где наблюдаются высокие значения тренда средних температур.

а) б)

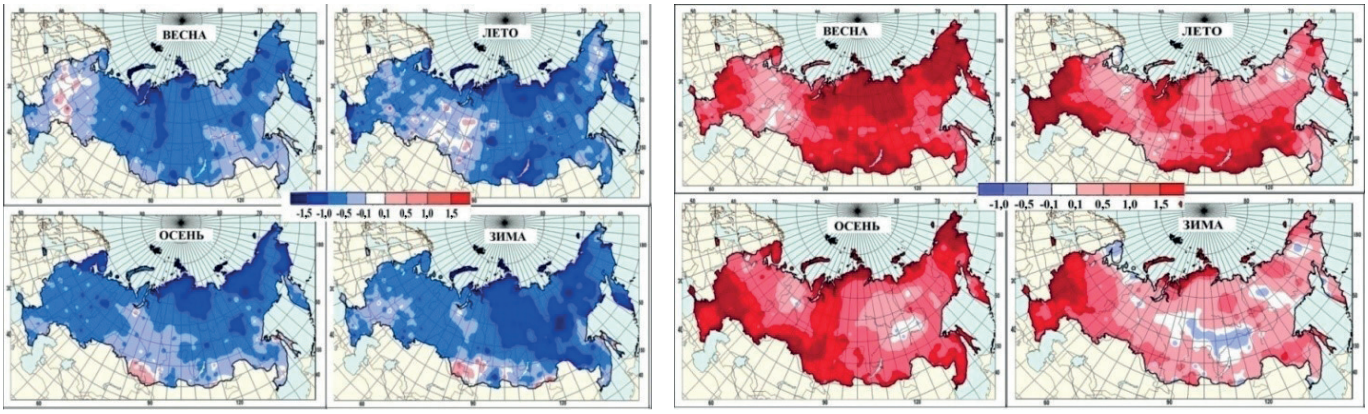



***Рис. 1.2.1.24*** *Коэффициент линейного тренда (дни/10 лет) сезонных показателей экстремальности температурного режима ND5 (а) и ND95 (б) за 1976-2019 гг.*

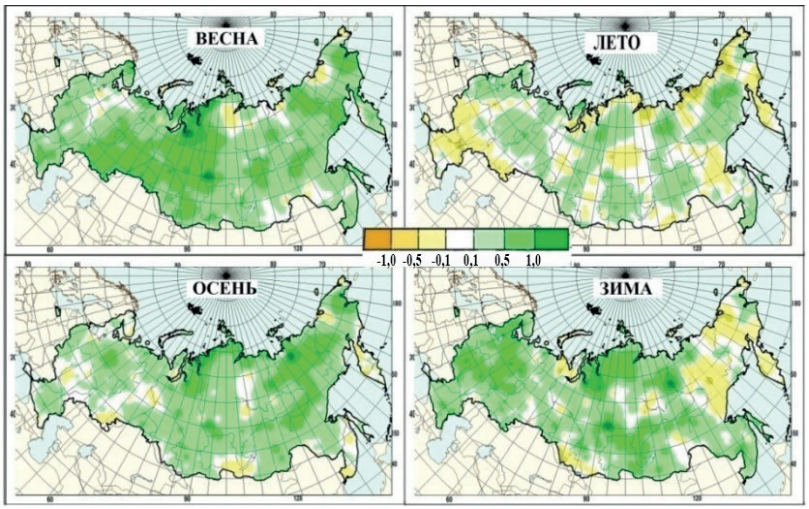
Для изменений статистики экстремальных температур в Причерноморском регионе показано (Коваленко и др., 2017), что в период современного потепления (с 1976 г.) растут значения 5-го и 95-го процентилей сезонных аномалий температуры для всех сезонов, кроме зимы. В эти же сезоны число экстремально холодных дней значимо убывает, а экстремально теплых – растет. Характеристики экстремальной температуры воздуха демонстрируют заметную межгодовую и долгопериодную изменчивость, связанную с изменчивостью САК. Наиболее явные проявления САК на территории Причерноморского региона отмечаются в показателях экстремумов холода в осенне-зимний период. В положительной фазе САК наблюдаются повышенные частота и интенсивность экстремально холодных погодных условий осенью, а зимой – пониженные. В отрицательной фазе САК частота экстремально высоких значений температуры воздуха во все сезоны выше.

**Атмосферные осадки**

Число дней с экстремальными осадками выше 95-го процентиля преимущественно увеличивается. Наибольший рост наблюдается весной, что согласуется с годовым ходом конвективной облачности. Летом, когда количество ливневых осадков максимально, на половине территории России количество осадков не увеличивается, а на другой увеличивается очень слабо. При этом сравнение трендов индекса R10 (числа дней с осадками более 10 мм) весной и летом (рис. 1.2.1.25) указывает на наличие летом значительного роста сильных осадков: такое различие связано со значительно меньшей интенсивностью весенних осадков на большой части территории, так что 95-й процентиль не достигает уровня сильных осадков 10 мм. Летом для R10 основные области, где тренд отрицателен, сохраняются.

За 1966-2012 гг. из таких показателей, как абсолютный сезонный максимум осадков, число относительных экстремумов (аналог NR95), длительность непрерывных периодов с осадками и сухих периодов наиболее явное увеличение характерно для длительности сухих периодов: в теплое полугодие оно проявляется почти на всей территории России, в холодное – за исключением ПФО и запада СКФО; периоды с осадками становятся короче в ЮФО в течение всего года (Золина, Булыгина, 2016).

а)




б)

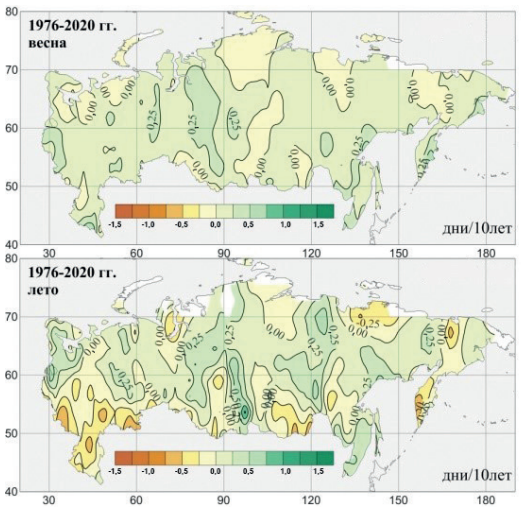



***Рис. 1.2.1.25*** *Коэффициент линейного тренда за 1976–2019 гг. (дни/10 лет) сезонного числа дней с осадками выше 95 го процентиля NR95 (а). То же для числа дней с осадками более 10 мм R10 за 1976–2020 гг. (б)*

Изменения функции плотности распределения индексов осадков (R5d, SDII, R20mm из списка, рекомендованного ВМО) в течение 1960-2012 гг. указывают на значительно возросшие риски сильных и продолжительных осадков на юге Западной Сибири (Шарапова и др., 2017). Тенденция к увеличению доли экстремальных осадков (выше 95 процентиля) в их общей сумме обнаружена на большей части Иркутской области зимой в 1963-2016 гг. (Кочугова, 2018). Число дней с сильными снегопадами увеличилось на большей части Западной Сибири и Красноярского края, куда в последние годы часто проникали атлантические циклоны, принося влажные воздушные массы (Коршунова и др., 2018).

Значительная часть экономических потерь от всех опасных гидрометеорологических явлений приходится на экстремальные осадки (Путырский, Кукушкина, 2019). Резкий рост экстремальных суточных сумм осадков в период 2000-2015 гг. отмечен для Сибирского (особенно летом) и Центрального ФО (особенно в весенне-осенний период).

**Другие показатели экстремальности**

**Засуха**

Сильная атмосферная засуха на ЕТР (определявшаяся с помощью стандартизованного индекса осадков SPI) развивается в периоды теплой фазы Атлантической междекадной осцилляции (АМО) и в особенности при отрицательной фазе циркуляционной моды ВАЗР, когда на ЕТР резко возрастает блокирующая антициклоническая активность (Черенкова и др., 2020). В последние десятилетия ВАЗР постоянно убывает. Рост среднесезонных температур и в особенности числа экстремально жарких дней на юге ЕТР с одновременным убыванием количества осадков значительно усиливают риск засухи.

С начала XXI века на Южном Урале число экстремальных засух при гидротермическом коэффициенте ГТК (ГТК = $10(R/T)_{T>10}$ – отношение

сумм осадков и температур за период вегетации T > 10 °C (Черенкова, Золотокрылин, 2016)), равном 0,6 и менее, увеличивается в июле и за лето в целом и уменьшается в июне и августе (Васильев и др., 2020), что объясняется перераспределением осадков внутри года – увеличением доли осадков в осенне-зимний сезон по сравнению с весенне-летним периодом.

**Метеорологические опасные явления**

Значительный практический интерес представляют изменения числа опасных метеорологических явлений, потенциально негативно отражающихся на различных аспектах экономики и жизнедеятельности. Во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) отмечено увеличение годового числа опасных метеорологических явлений в период с 1998 года. Этот рост прекратился в 2016 году, и последние четыре года число опасных явлений сохраняется на уровне 2012 года (Росгидромет, 2021). После 2014 года число опасных гидрометеорологических явлений, включая агрометеорологические и гидрологические, нанесших значительный ущерб отраслям экономики и жизнедеятельности населения, не увеличивается (Росгидромет, 2021). Однако в теплый период, когда наблюдается наибольшее число связанных с конвективными процессами опасных погодных явлений, этот рост продолжается (исключая август). Наиболее быстрый рост отмечен в мае: 65% от среднего за 1998-2020 гг. за десятилетие, в июне и июле – около 56%, а наименьший – в ноябре (25%).

**Ледяная корка**

Ледяная корка считается опасным агрометеорологическим явлением, если при толщине 5 мм она удерживалась более 10 дней (Руководящий документ, 2008). В поле число дней с опасными корками уменьшается на всей территории ЕТР и юге Западной Сибири, аналогично изменениям максимальной толщины ледяной корки (см. рис. 1.2.1.34а). На большей части страны тенденций в изменении числа дней с максимальной толщиной ледяной корки, превышающей критическое значение 5 мм, в лесах не выявлено.

### 1.2.1.9 Поверхностные воды суши

К основным характеристикам водного режима относят годовой сток и его внутригодовое распределение, максимальный и минимальный стоки. Связываемые с воздействием климатических факторов изменения в водном режиме отмечаются для периода с конца 1970-х годов до середины 1980-х гг.

Годовой сток рек с территории России с 1977 года не опускался ниже 4000 км$^3$/год (рис. 1.2.1.26). Средняя величина объема речного стока в период с 1961 по 1990 г. составила 4290 км$^3$/год, в период с 1991 по 2020 г. – 4490 км$^3$/год.

Статистически значимое увеличение годового стока установлено для бассейнов рек Лена, Индигирка, районов западных склонов Уральских гор, горных районов Северного Кавказа, северо-востока АТР, а снижение – на равнинных реках юга ЕТР, на ряде рек бассейнов Оби и Енисея, крайнего северо-востока АТР и Камчатки. Уменьшение ресурсов поверхностных вод отмечается для бассейнов Дона, рек Камчатского полуострова. На преобладающей части страны эти изменения колеблются в пределах ±10%.

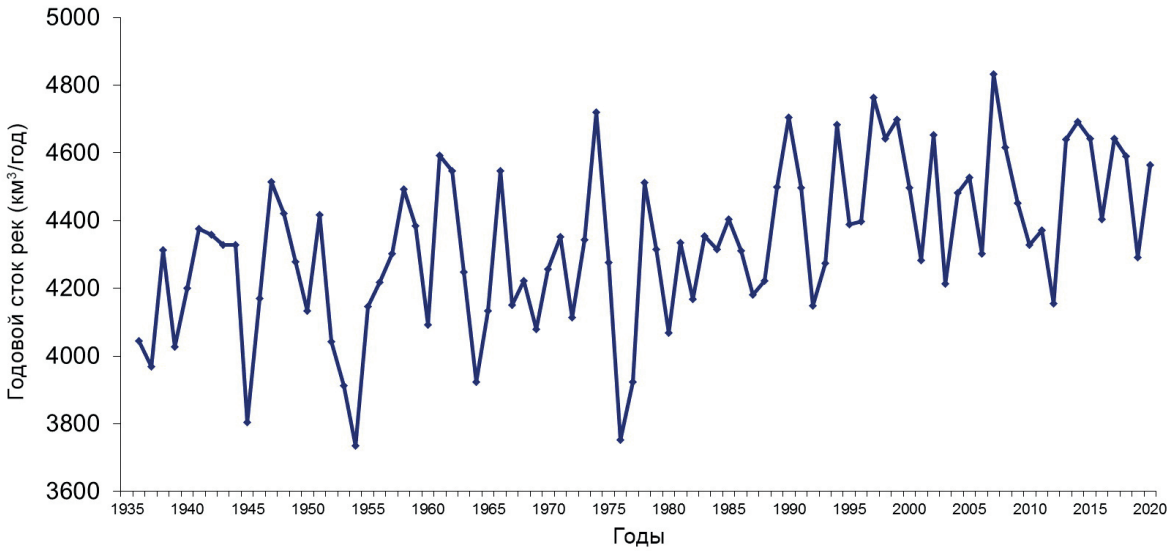



***Рис. 1.2.1.26*** *Многолетние колебания годового стока рек России, 1936-2020 гг., по данным ИАЦ ГВК ФГБУ «ГГИ»*

Для преобладающей части территории Российской Федерации изменения максимального стока незначительны, находятся в пределах ±10% от нормы за базовый период и являются статистически незначимыми.

Нарушение однородности в рядах максимального стока характерно для рек южного и юго-западного районов равнинной части ЕТР. В бассейнах Нижней Волги, Дона, Днепра, а также южной части бассейна Оки на преобладающей части рек, начиная с 1979-1983 гг., произошли снижение максимальных расходов воды на 40-60% и статистически значимое уменьшение дисперсии в последние десятилетия. Здесь неоднородными по критериям Стьюдента и Фишера оказались, соответственно, 81 и 60% всех рядов максимального стока, а значимые отрицательные тренды установлены для 93% рядов максимального стока.

Нарушение однородности в многолетних рядах максимальных в году расходов воды, начиная с 1985-1986 гг., отмечено для отдельных рек Черноморского побережья, Северного Кавказа, горных и предгорных районов юга Западной Сибири, Восточных Саян, бассейна Амура, где основным фактором формирования максимального стока являются дождевые осадки. Следует отдельно обратить внимание на реки бассейна Кубани, на которых средний максимальный расход воды за современный период был на 30-55% больше, чем за предыдущий, и где значительно увеличилась его дисперсия (реки Лаба, Белая, Уруп).

Произошедшие в последнее десятилетия на реках Волжского бассейна изменения в режиме максимального и минимального стоков обусловлены влиянием климатических факторов, имеют региональный характер и отличаются по моменту их начала, направленности и интенсивности. Наиболее значительные изменения в характере многолетних колебаний экстремальных характеристик стока отмечаются в южной части рассматриваемой территории, где увеличение минимального суточного зимнего и летне-осеннего стока достигло 100-250%, а максимальные расходы весеннего половодья снизились на 40-60%. В целом опасность экстремальных гидрологических явлений для

территории Волжского бассейна уменьшилась, за исключением северной части бассейна Камы и ее левобережных притоков, а также бассейнов рек Унжа и Ветлуга, где возросла повторяемость максимальных расходов воды малой обеспеченности (Георгиевский и др., 2019). Произошедшие изменения следует рассматривать как положительные для водохозяйственного комплекса, учитывая значительное снижение повторяемости экстремально низких и высоких расходов воды на преобладающей части территории бассейна.

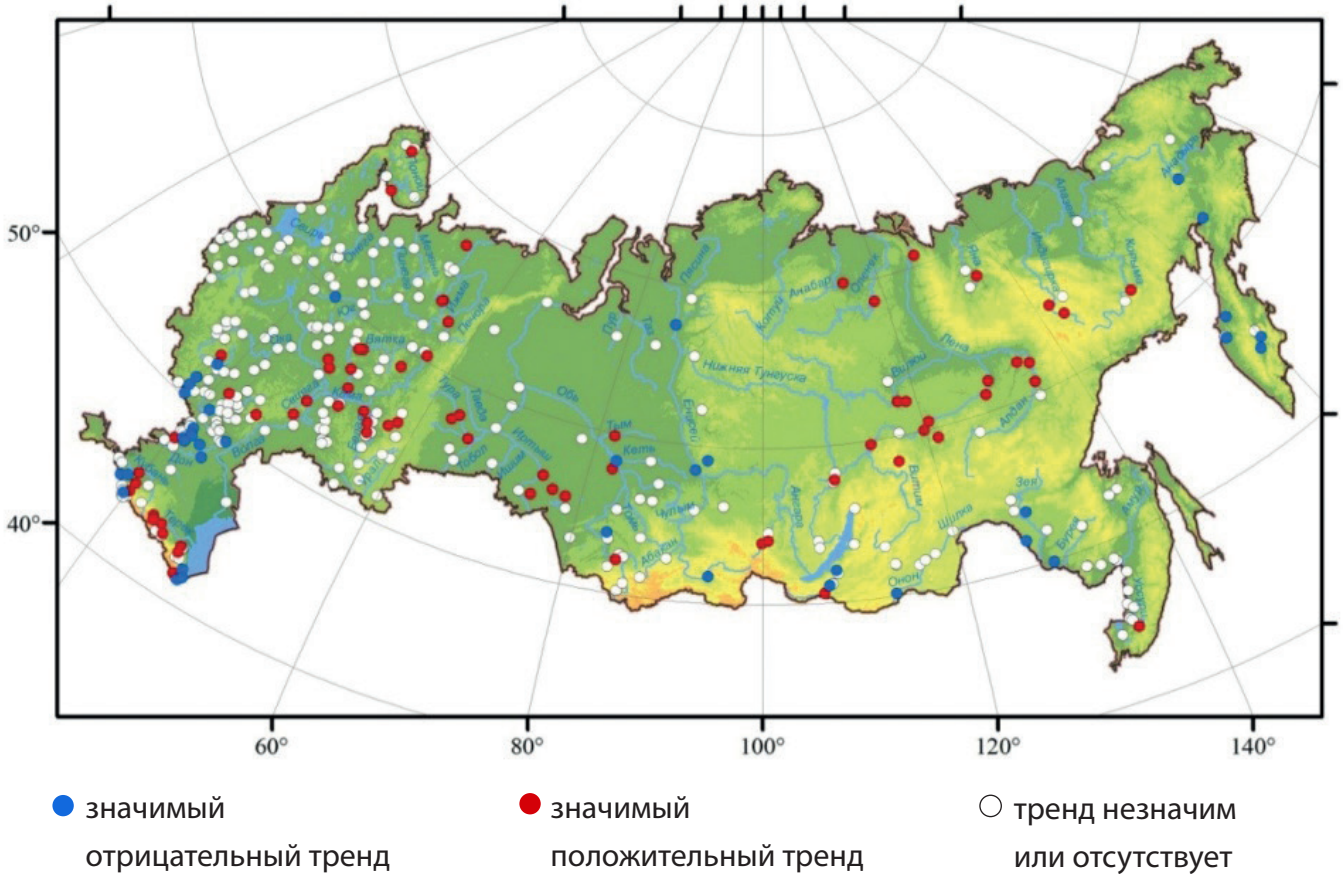



***Рис. 1.2.1.27*** *Тренды годового стока рек России, 1936-2020 гг., по данным ФГБУ «ГГИ»*

Минимальный зимний сток рек увеличился на преобладающей части территории страны. Наиболее значительное увеличение (до 100-200%) отмечается на равнинных реках юга ЕТР. В современный период, в результате происходящих климатических изменений, и прежде всего повышения зимней температуры воздуха, произошло значительное сокращение числа лет, когда формируется водонепроницаемый слой почвы на водосборах. В этих климатических условиях в период весеннего половодья снижается поверхностный сток и возрастает инфильтрационное питание грунтовых вод, что определяет увеличение их запасов и, как следствие, увеличение подземного питания водотоков в меженный период. При этом реакция водного режима рек на климатические изменения в значительной мере зависит от гидрогеологических особенностей водосборов, определяющих инерционность процессов пополнения и разгрузки их подземных емкостей.

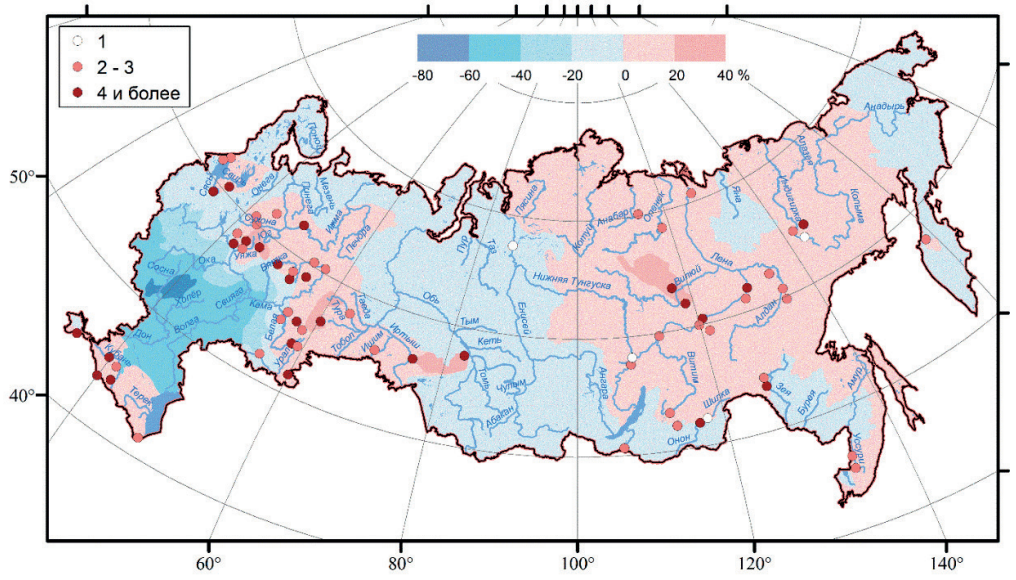



***Рис. 1.2.1.28*** *Изменение (%) максимального стока рек России в современный период по отношению к предшествующему*

*Кружки – число случаев (число лет) с превышением максимального расхода воды 10%-й обеспеченности в современный период (1981-2016 гг.) по отношению к предшествующему (1950-1980 гг.) (Георгиевский и др., 2019)*

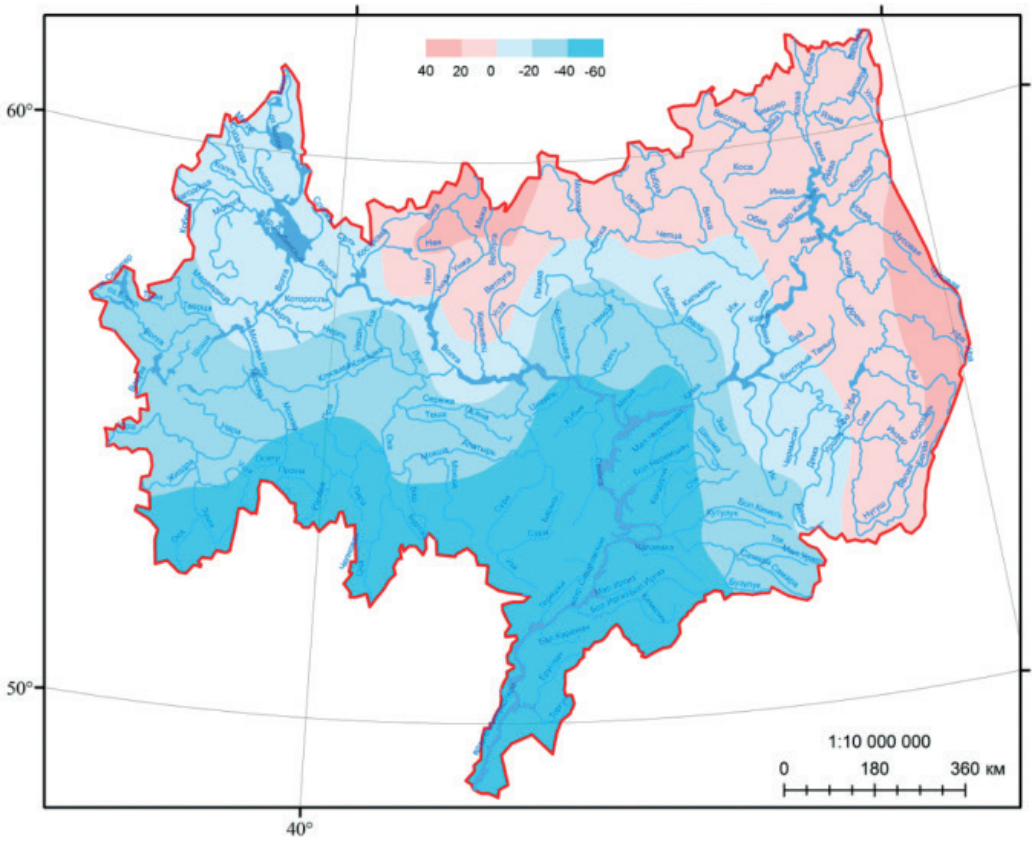



***Рис. 1.2.1.29*** *Изменение (%) максимального весеннего стока рек бассейна Волги в современный период по отношению к предшествующему (Георгиевский и др., 2019).*

Исследования, основанные на анализе многолетних данных воднобалансовых станций, расположенных в пределах бассейна реки Дон (Журавин и др., 2020), подтверждают наличие климатических изменений, которые привели к изменениям в формировании стока воды и других элементов водного баланса. Показано, что основные изменения в гидрологическом режиме водных объектов обусловлены снижением влияния на него криогенного регулирования водообмена в бассейне. Это проявляется в двух процессах: росте инфильтрации атмосферных осадков в зону аэрации и грунтовые воды и улучшении дренирования подземных вод гидрографической сетью. В начальный период преобладает первый процесс, что приводит к уменьшению доли поверхностного стока, к подъему уровня грунтовых вод – росту подземного питания рек. В последующем возрастает роль второго процесса, в результате чего постепенно снижаются запасы подземных вод в бассейне, уровень грунтовых вод и меженный сток рек. Баланс процессов пополнения и сработки подземных вод восстанавливается после прекращения формирования криогенных явлений в речном бассейне, связанных с фазовыми переходами «вода – лед (снег) – вода». С большой вероятностью можно предположить, что перестройка этих процессов к настоящему времени близка к завершению.

### 1.2.1.10 Снежный покров

Изменения характеристик снежного покрова оценивались с использованием регулярно пополняемого массива данных ежедневных наблюдений за высотой снежного покрова и степенью покрытия снегом окрестностей станции для 820 метеостанций России (Булыгина и др., 2014; Булыгина и др., 2015а) (рис. 1.2.1.30а). Анализ влагозапаса осуществлялся по данным маршрутных снегомерных съемок на 958 метеостанциях (рис. 1.2.1.30б, в). Эти данные доступны на сайте ВНИИГМИ–МЦД (http://www.meteo.ru). Из 958 станций на 665 проводятся наблюдения в поле, на 425 – в лесу (на части станций осуществляются наблюдения и в поле, и в лесу). Региональный анализ проводился по районам, выбранным на основании классификации Алисова (Алисов, 1956; см. также схему в (Росгидромет, 2021)).

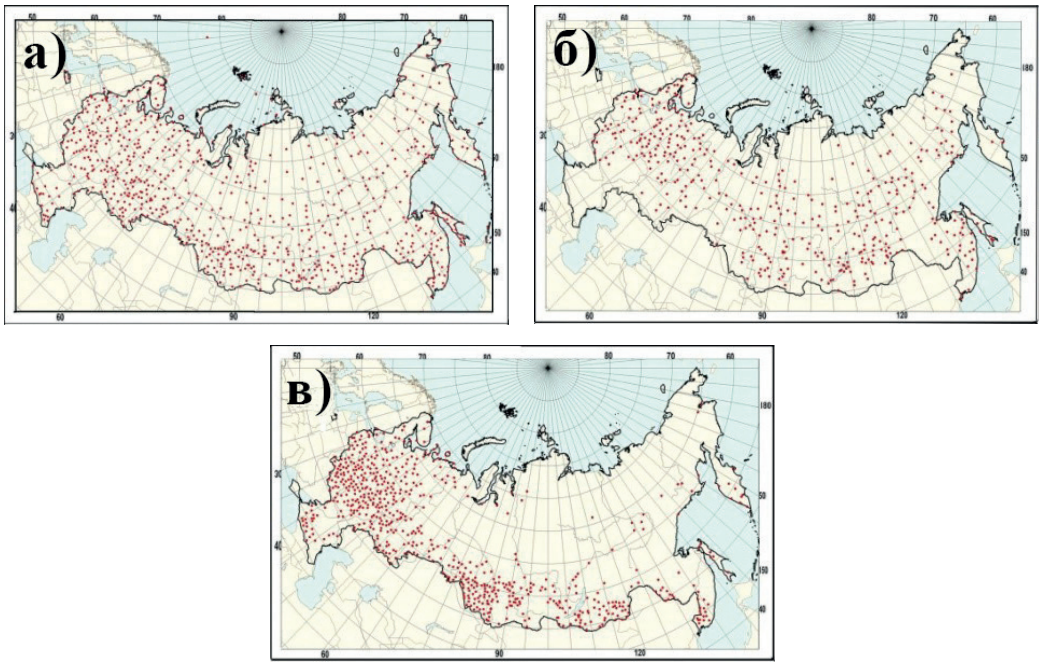



***Рис. 1.2.1.30*** *Расположение метеостанций, выполняющих ежедневные наблюдения за снежным покровом (а), маршрутные снегосъемки в лесу (б) и в поле (в)*

На большей части территории России период с 1976 по 2020 г. отмечается тенденция увеличения максимальной высоты снежного покрова Hmax (рис. 1.2.1.31а). Подтверждается отмеченная во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) тенденция его роста на севере Западной Сибири, в Поволжье, на Дальнем Востоке. Уменьшение Hmax наблюдается в ряде северных районов. Одной из причин уменьшения Hmax на севере Камчатского края является уменьшение числа дней с экстремально большими осадками, а также увеличение числа оттепелей весной (Коршунова и др., 2018). Во многих районах тенденции оказались неустойчивы: изменились по сравнению с представленными во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). Значительно уменьшились области отрицательных трендов в восточных районах ЕТР и южных – АТР, а в северо-западных областях ЕТР знак тренда поменялся на отрицательный.

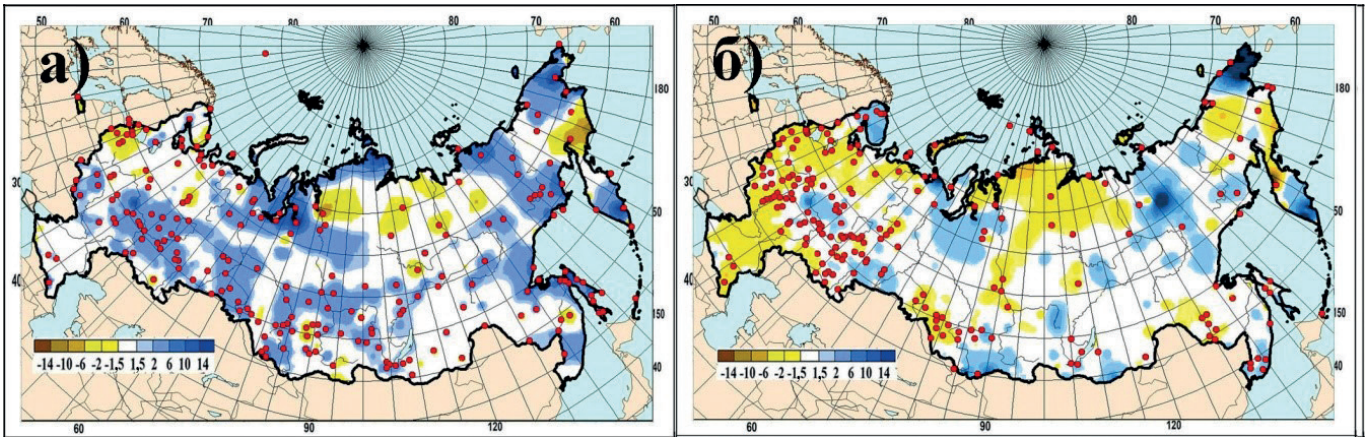



***Рис. 1.2.1.31*** *Коэффициенты линейного тренда (см/10 лет) в рядах максимальной за зимний период высоты снежного покрова (а) и в рядах числа дней со степенью покрытия окрестностей станции снегом более 50% (б). 1976-2020 гг.*

*Красные кружки – станции, где тренд значим на уровне 5%*

В среднем для России число дней со снегом сокращается на 1,17 дня за 10 лет. Во многих районах по-прежнему наблюдается значимая тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова, но на АТР эта часть территории значительно сократилась по сравнению с отмеченной во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). На ЕТР область отрицательной тенденции значительно выросла и охватывает большую часть территории (рис. 1.2.1.31б).

Изменение режима оттепелей оказывает значительное влияние на снегонакопление (Коршунова, Давлетшин, 2019). На ЕТР наблюдается значительное увеличение оттепелей в зимний период (рис. 1.2.1.32б), что приводит к уменьшению высоты снежного покрова. На юге Западной Сибири число дней с оттепелями растет в конце осени – начале зимы (ноябрь – декабрь) и в начале весны (март). На севере АТР выявлена тенденция увеличения весенних оттепелей. По данным в поле значимое увеличение запаса воды в снеге наблюдается в основном в центре и восточных районах ЕТР, на севере и юге Западной Сибири (рис. 1.2.1.33а). Тенденция уменьшения отмечена на северо-западе и севере ЕТР. Средний для страны в целом запас воды в сне-

ге по данным маршрутных снегосъемок в поле увеличивается на 2,16 мм за 10 лет. В лесу средний для страны максимальный за зиму запас воды в снеге уменьшается на 1,49 мм за 10 лет; значимое уменьшение отмечается на ЕТР и на западе Сибири (рис. 1.2.1.33б). Заметный рост наблюдается в долине Колымы.

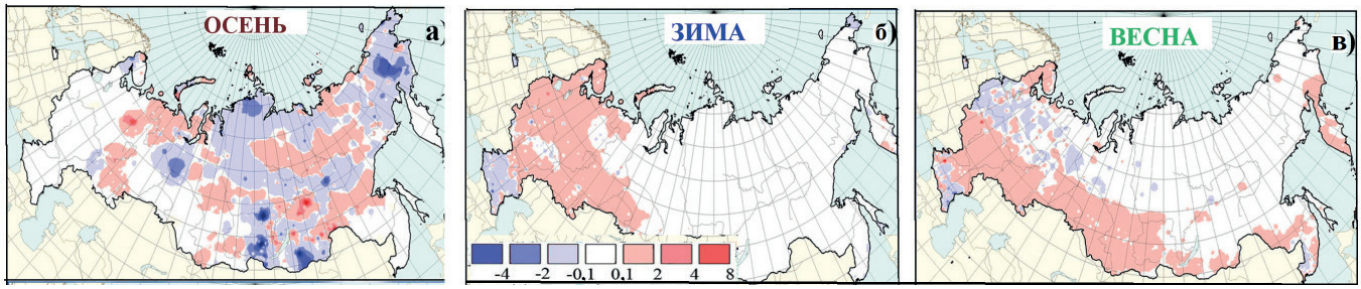



***Рис. 1.2.1.32*** *Коэффициенты линейного тренда (дни/10 лет), значимые на 5%-м уровне, в рядах числа дней с оттепелью: осень (а); зима (б); весна (в) (Коршунова и др., 2018)*

*Оттепель – повышение средней суточной температуры воздуха до 0 °С и выше внутри холодного периода при среднесуточной температуре воздуха устойчиво ниже 0 °С (Хайруллин, 1969)*

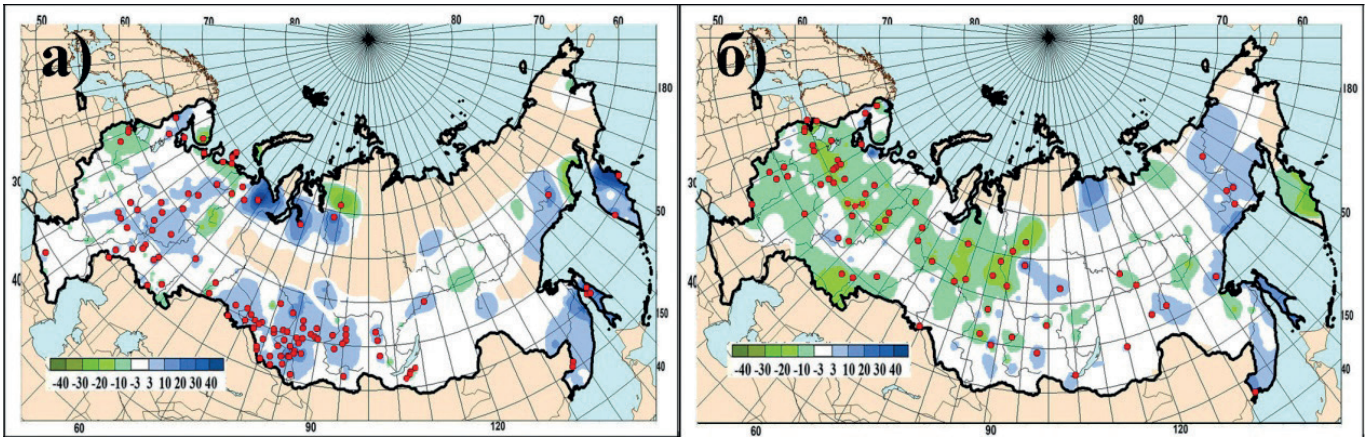



***Рис. 1.2.1.33*** *Коэффициенты линейного тренда (мм/10 лет) в рядах запаса воды в снеге за зимний период в поле (а) и в лесу (б). 1976-2020 гг.*

*Красными кружками показаны станции, где тренд значим на уровне 5%*

В изменении максимальной толщины ледяной корки выявлена тенденция уменьшения на больших территориях и в лесу, и в поле (рис. 1.2.1.34). Наиболее явно эта тенденция проявляется в западных областях ЕТР, где на фоне потепления и частых оттепелей, которые способствуют образованию ледяных корок, сокращается и становится более интенсивным процесс весеннего снеготаяния, имеющий обратное действие. Тенденции продолжительности залегания корок в поле географически полностью подобны тенденциям для их толщины (максимум на западе ЕТР до 10 дней/10 лет). В лесу изменений не отмечено.

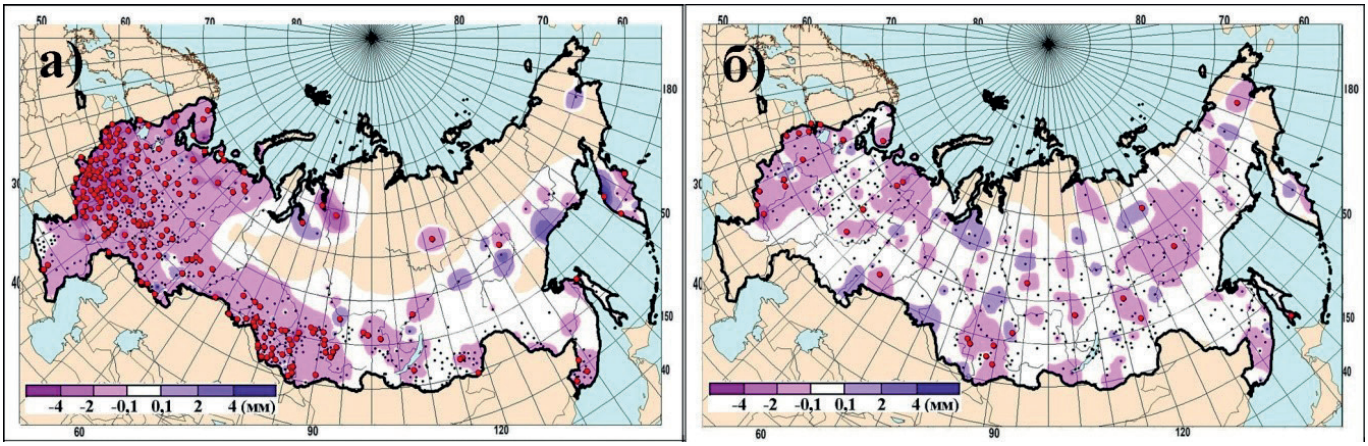



***Рис. 1.2.1.34*** *Коэффициенты линейного тренда максимальной толщины ледяной корки (мм/10 лет) для полевых (а) и лесных (б) маршрутов снегосъемок в холодный период на территории Российской Федерации*

*Красными кружками показаны станции, где тренд значим на уровне 5%*

## Список литературы


**Алисов Б. П., 1956б:** Климат СССР. – М.: Московский университет, 127 с.

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., 2019:** Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 5-19.

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., 2015а:** Особенности изменчивости циклонической активности умеренных широт Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 2. – С. 14-40.

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., 2015б:** Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы // Труды ГМЦ России. – № 358. – С. 13-35.

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., 2019:** Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 3. – С. 32-58, DOI: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф., 2021:** Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 2. – С. 57-80.

**Бардин М. Ю., Полонский А. Б., 2005:** Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. – Том 41, № 2. – С. 3-13.

**Бардин М. Ю., Ранькова Э. Я., Платова Т. В., Самохина О. Ф., Корнева И. А., 2020:** Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 29-46.

**Беккиев М. Ю., Докукин М. Д., Калов Р. Х., Ташилова А. А., 2021:** Изменения климата и деградация долинных ледников центрального Кавказа // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 7, № 3. – С. 113-141.

**Булыгина О. Н., Дементьева Т. В., Коршунова Н. Н., 2020:** Методика мониторинга климата на территории России: режим приземного ветра / В кн.: Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов: Информационный сборник, № 47. – С. 22-32.

**Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М., 2014:** Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР» – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201. http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описание-массива-данных

**Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М., 2015а:** Описание массива данных «Маршрутные снегомерные съемки» – Свидетельство о государственной регистрации № 2013620279. http://meteo.ru/data/166-snow-surveys#описание-массива-данных

**Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М., 2015б:** «Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)» – Свидетельство о государственной регистрации № 2014620942. http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных

**Васильев Д. Ю., Водопьянов В. В., Семенов В. А., Чибилев А. А., 2020:** Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960-2019 гг. с использованием различных методов // Доклады РАН. – Т. 494, № 1. – С. 91-96.

**Виноградова В. В., 2014:** Волны тепла на Европейской территории России в начале XXI века // Известия РАН, Серия географическая. – № 1. – С. 47-55.

**Виноградова В. В., 2018:** Зимние волны холода на территории России со второй половины XX века // Известия РАН, Серия географическая. – № 3. – С. 37-46.

**ВМО, 2014:** Руководство по климатологической практике – ВМО, № 100.

**ВМО, 2017:** Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм – ВМО-№ 1203.

**Волкова М. А., Чередько Н. Н., Титовская А. А., Журавлев Г. Г., 2019:** Изменения параметров экстремальности температурного режима на юге Западной Сибири в холодный период // Труды ГГО. – Вып. 594. – С. 120-136.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2019:** Оценка современных

изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. – № 11. – С. 46-55.

**Горбаренко Е. В., 2016:** Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ// Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 5-12.

**Горбаренко Е. В., 2019:** Изменчивость солнечного сияния в Москве за период 1955-2017 гг. // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 24-36.

**Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Самохина О. Ф., 2021:** Особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2020 году // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 2. – С. 28-58.

**Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В., 2017:** Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – № 44. – С. 3-11.

**Журавин С. А., Марков М. Л., Гуревич Е. В., 2020:** Многолетние изменения процессов влагооборота по данным воднобалансовых станций в центральной части бассейна р. Дон // Водные ресурсы. – 47 (6). – С. 729-741.

**Золина О. Г., Булыгина О. Н., 2016:** Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 1. – С. 84-103.

**Золотарев Е. А, Харьковец Е. Г., 2012:** Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лед и снег. – Т. 52, № 2. – С. 15-22.

**Ивахов В. М., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Зинченко А. В., Лоскутова М. А., Макштас А. П., Кустов В. Ю., Лаурила Т., Аурела М., Асми Э., 2019:** Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010-2017 гг. // Метеорология и гидрология. – № 4. – С. 110-121.

**ИГКЭ, 2020:** Мониторинг изменений климата Земного шара. http://climatechange.igce.ru/ index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=31&Itemid=75&lang=en

**Коваленко О. Ю., Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н., 2017:** Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 2. – С. 42-62.

**Кононова Н. К., 2018:** Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899-2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 3. – С. 108-123.

**Коршунова Н. Н., Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Давлетшин С. Г., 2018:** Оценка экстремальности температурного режима и режима осадков на территории Российской Федерации и ее регионов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – Вып. 183. – С. 20-30.

**Коршунова Н. Н., Давлетшин С. Г., 2019:** Климатические характеристики оттепелей на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – Вып. 184. – С. 24-32.

**Кочугова Е. А., 2018:** Климатические изменения режима увлажнения Иркутской области в зимний период // Известия Иркутского государственного университета, Серия Науки о Земле. – Т. 25. – С. 107-120.

**Методика, 2016:** Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Бардин М. Ю., Рочева Э. В., Самохина О. Ф., Платова Т. В., Соколов Ю. Ю. Методика мониторинга климата на территории Российской Федерации: температура приземного воздуха, атмосферные осадки / Методический кабинет Гидрометцентра России. Методы, технологии. http://method.meteorf.ru/methods/long/monitor/monitor.html

**МУ, 1969а:** Указания для управлений Гидрометеорологической службы по вычислению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 53 с.

**МУ, 1969б:** Указания для гидрометеорологических станций по введению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 31 с.

**Наставление, 1969:** Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 300 с.

**Наставление, 1997:** Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Актинометрические наблюдения на станциях. Часть 1. – СПб.: Росгидромет, 222 с.

**Обзор, 2021:** Обзор состояния и функционирования автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2020 г. [http://voeikovmgo.ru/images/stories/ publications/2021]

**Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Ивахов В. М., 2021:** Содержание $CO_2$ и $CH_4$ в атмосфере / В кн.: Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год, Г. М. Черногаева (ред.). – М.: Росгидромет, с. 28-30. http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2020.pdf

**Попова В. В., 2018:** Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 1. – С. 84-111.

**Путырский В. Е., Кукушкина А. В., 2019:** Динамика количественных характеристик экстремальных атмосферных осадков на территории Российской Федерации // Природо-обустройство. – № 3. – С. 115-120.

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Бедрицкий А. И. и др., ред.). – М.: Росгидромет, том 1, 227 с., и том 2, 288 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). –М.: Росгидромет, 1008 с.

**Росгидромет, 2020:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. – М.: Росгидромет, 97 с. ISBN 978-5-906099-58-7 http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru.

**Росгидромет, 2021:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – М.: Росгидромет, 104 с. ISBN 978-5-9631-0895-6

**Руководящий документ № 52.88.699-2008, 2008:** Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. – М.: Росгидромет, 33 с.

**Русина Е. Н., Боброва В. К., 2021:** Оптическая плотность и прозрачность атмосферы. В кн.: Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год (Черногаева Г. М., ред.). – М.: Росгидромет. – С. 30-33.

**Стратегия, 2010:** Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата). URL: http://government.ru/docs/25150/ (дата обращения 15.11.2019).

**Хайруллин К. Ш., 1969:** Оттепели на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 88 с.

**Харюткина Е. В., Логинов С. В., Усова Е. И., Мартынова Ю. В., Пустовалов К. Н., 2019:** Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 2. – С. 45-65.

**Хлебникова Е. И., Задворных В. А., Стадник В. В., 2022:** Климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности и облачности по данным актинометрических наблюдений на территории России // Труды ГГО, Вып. 606 (в печати).

**Хлебникова Е. И., Махоткина Е. Л., 2014:** Облачность и радиационный режим. / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – С. 110-124.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2009:** Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 5-13.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2014:** Региональные климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности на территории России // Труды ГГО. – Вып. 570. – С. 34-49.

**ЦМКП, 2016:** Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 20 декабря 2016 г. http://method.meteorf.rum.

**Черенкова Е. А., Бардин М. Ю., Платова Т. В., Семенов В. А., 2020:** Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на формирование сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 5-19.

**Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н., 2016:** О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 2. – С. 79-94.

**Шарапова А. А., Кужевская И. В., Каштанова К. А., Поляков Д. В., 2017:** Характеристики экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Географический вестник. Geographical bulletin. № 3 (42). – С. 88-98. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-88-98

**Швер Ц. А., 1976:** Атмосферные осадки на территории СССР. – Л., Гидрометеоиздат, 302 с.

**Шерстюков А. Б., 2012:** Массив суточных данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД, Вып. 176. – С. 233-256.

**Шерстюков А. Б., Шерстюков Б. Г., 2015:** Пространственные особенности и новые тенденции в изменени-

ях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // Метеорология и гидрология. – № 2. – С. 5-12.

**Atakuyev Zh. K., Bekkiyev M. Yu., Dokukin M. D., Kalov Kh. M., Kalov R. H., Tashilova A. A., Hatkutov A. V., 2016:** Influence of climatic changes on dynamics of glaciers, exogenous processes and recreational complexes of vicinity of the Mt. Elbrus // Reports of AMAH, v. 18, № 1, pp. 62-80.

**Barnston A. G., Livezey R. E., 1987:** Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review., v. 115, pp. 1083-1126.

**Chernokulsky A. V., Mokhov I. I., 2012:** Climatology of total cloudiness in the Arctic: An intercomparison of observations and reanalyses // Advances in Meteorology, v. 2012, 15 p., doi: 10.1155/2012/542093.

**Chernokulsky A. V., Kozlov F., Mokhov I. I., Semenov V. A., Zolina O., Bulygina O., 2019:** Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters, v. 14, № 4, p. 045001.

**Corti S., Molteni F., Palmer T. N., 1999:** Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes // Nature, v. 398, pp. 799-802.

**Gillett N. A., Fyfe J. C., 2013:** Annular Mode change in the CMIP5 simulations // Geophysical Research Letters, v. 40, pp. 1189-1193.

**Hasselmann K., 1999:** Linear and Nonlinear Signatures of Climate Change // Nature, v. 398, pp. 755-756.

**IPCC, 2001:** The Scientific Basis. J. T. Houghton et al. (eds.) – Cambridge University Press, 881 pp.

**IPCC, 2007:** The Physical Science Basis. S. Solomon et al. (eds.) – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

**IPCC, 2013:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

**IPCC, 2014:** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)] – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

**IPCC, 2021:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)] – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

**Kalov Kh. M., Bekkiyev M. Yu., Kesheva L. A., Kalov R. H., Tashilova A. A., Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., 2018:** Influence of Temperature Changes in Lower Atmosphere on Dynamics of Glaciers and Height of Snow Line on Elbrus // Advances in Engineering Research, v. 177, pp. 493-498.

**Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996:** The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society, March.

**Lohmann U., Feiter J., 2005:** Global indirect aerosol effects: a review // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 5, pp. 715-737.

**Makarova M. V., Alberti C., Ionov D. V., Hase F., Foka S. C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y. A., Kostsov V. S., Frey M., Poberovskii A. V., Timofeyev Y. M., Paramonova N. N., Volkova K. A., Zaitsev N. A., Biryukov E. Y., Osipov S. I., Makarov B. K., Polyakov A. V., Ivakhov V. M., Imhasin H. K., Mikhailov E. F., 2021:** Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME) / An Overview and First Results of the St. Petersburg Megacity Campaign 2019 // Atmospheric Measurement Techniques, v. 14, pp. 1047-1073.

**Mateos D., Sanchez-Lorenzo A., Anton M., Cachorro V. E., Calbo J., Costa M. J., Torres B., Wild M., 2014:** Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, v. 119, pp. 10382-10393.

**Palmer T. N., 1999:** A nonlinear dynamical perspective on climate prediction // Journal of Climate, v. 12, pp. 575-591.

**Paramonova N. N., Ivakhov V. M., 2021:** Atmospheric $CO_2$ at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CO2_TER_ surface-flask_MGO_ data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320, https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1001-01-02-9999 (Reference date: 2022/01/10).

**Sanchez-Lorenzo A., Wild M., Brunetti M., Guijarro J. A., Hakuba M. Z., Calbó J., Mystakidis S., Bartok B., 2015:** Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939-2012) // Journal of Geophysical Research-Atmospheres, v. 120, doi:10.1002/2015JD023321.

**Wallace J. M., Zhang Y., Bajuk L., 1996:** Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature // Journal of Climate, v. 9, pp. 249-59.

**Wang K., Ma Q., Wang X. Y., Wild M., 2014:** Urban impacts on mean and trend of surface incident solar radiation // Geophysical Research Letters, v. 13, № 41, pp. 4664-4668.

**Wild M., 2009:** Global dimming and brightening: A review // Journal of Geophysical Research Atmospheres, v. 12, № 114, pp. 1-31, doi:10.1029/2008JD011470.

**Wild M., 2012:** Enlightening global dimming and brightening // Bulletin of the American Meteorological Society, v. 1, № 93, pp. 27-37.

**Wild M., 2016:** Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 1, № 7, pp. 91-107.

**Wild M., Ohmura A., Schär C., Müller G., Folini D., Schwarz M., Hakuba M., Sanchez-Lorenzo A., 2017:** The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes // Earth System Science Data, v. 2, № 9, pp. 601-613.

**Wild M., Wacker S., Yang S., Sanchez-Lorenzo A., 2021:** Evidence for Clear-Sky Dimming and Brightening in Central Europe // Geophysical Research Letters, v. 48 (6), 2020GL092216, doi:10.1029/2020gl092216.

**WMO, 2021:** Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020, № 17.

**Zinchenko A. V., Paramonova N. N., Privalov V. I., Reshetnikov A. I., 2002:** Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach // Journal of Geophysical Research, v. 107, 11 p. https://doi.org/10.1029/2001JD001369.

## 1.2.2 Ожидаемые изменения[1]

***Т. В. Павлова, В. А. Говоркова, В. П. Мелешко, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник***

### 1.2.2.1 Термический режим

Территория Российской Федерации и особенно ее Арктической зоны (АЗРФ), по оценкам моделей CMIP6 (Eyring et al., 2016; см. также главу 1.1.2 и Приложение 1.2.2.1) для сценариев SSP (Riahi et al., 2017), как и по оценкам моделей предыдущих поколений для сценариев SRES (Nakićenović et al., 2000) и RCP (van Vuuren et al., 2011), остается регионом Земли, в котором ожидаемое в XXI веке потепление климата существенно превышает среднее глобальное потепление для любого из рассматриваемых сценариев (рис. 1.2.2.1, 1.2.2.2).

Качественно этот результат согласуется с оценками моделей предыдущих поколений (Росгидромет, 2008, 2014) для сценариев SRES и RCP соответственно. Такое географическое распределение роста приземной температуры воздуха в XXI веке давно известно из литературы, а его причины хорошо изучены (см., например, Росгидромет, 2008, 2014). То же относится и к особенностям сезонного распределения изменений термического режима на территории Российской Федерации – с выраженной зональностью зимнего потепления, достигающего максимальных значений в АЗРФ, и с существенно отличным характером летнего потепления (рис. 1.2.2.3, 1.2.2.4).

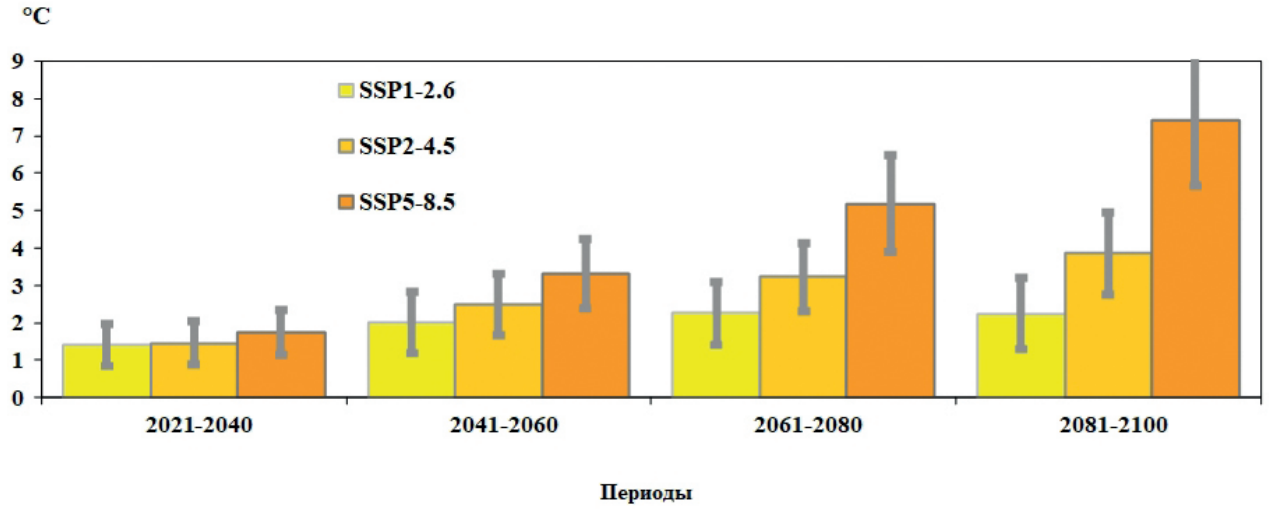



***Рис. 1.2.2.1*** *Изменение средней годовой температуры приземного воздуха (°C) на территории Российской Федерации в XXI веке (в среднем за каждое из четырех двадцатилетий: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 гг.) по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях*

[1] В настоящей главе рассматриваются модельные прогнозы по сценариям слабого (SSP1-2.6), умеренного (SSP2-4.5) и сильного (SSP5-8.5) антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. В соответствии с работой (O'Neill et al., 2020) все три выбранных сценария наиболее часто использовались в научных работах для получения климатических оценок. Учитывая близость сценариев нового поколения SSP2-4.5 и SSP5-8.5 со сценариями предыдущего поколения RCP4.5 и RCP8.5 по величине радиационного воздействия и по ожидаемым температурным изменениям, естественно ставить вопрос о сравнении оценок, полученных по этим сценариям. В приводимом ниже анализе использованы данные 37 моделей (в отдельных случаях – меньшего их числа) CMIP6, результаты сценарного прогнозирования климата с которыми были доступны к началу проведения анализа (Катцов и др., 2022).

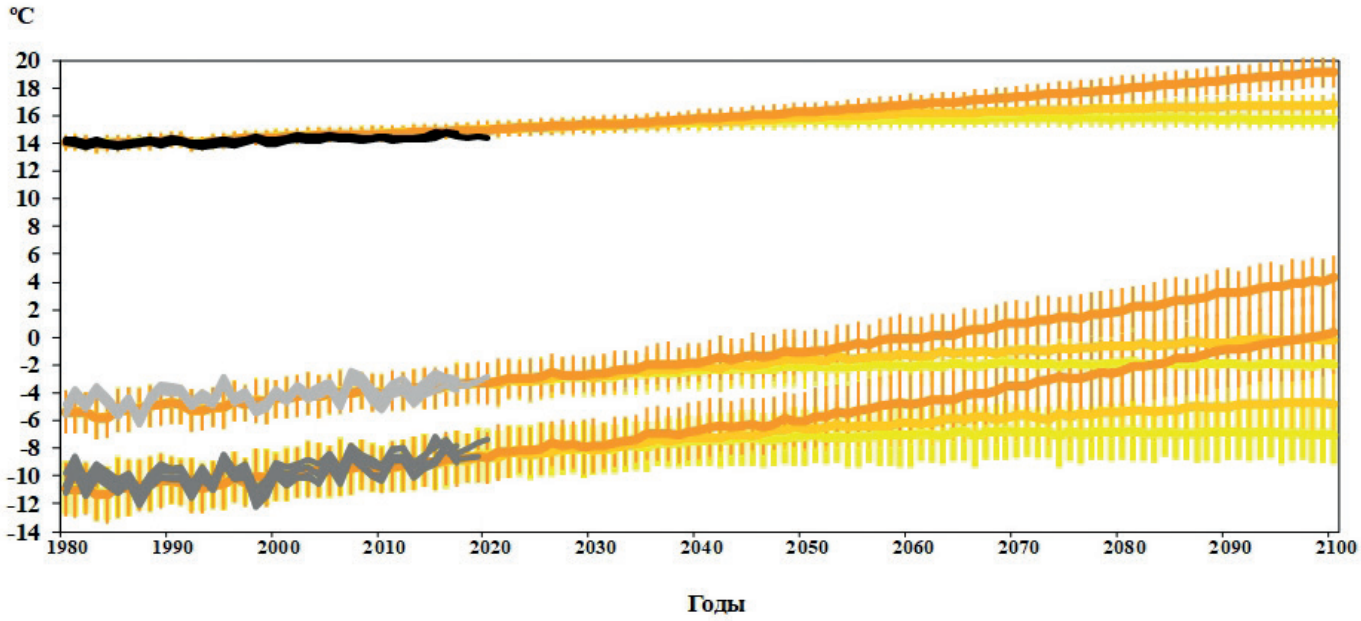



***Рис. 1.2.2.2*** *Эволюция средней годовой температуры приземного воздуха (°С): глобальной (вверху), на территории Российской Федерации (в середине) и в Арктической зоне Российской Федерации (внизу) в период 1980-2100 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 1.2.2.1.*

*Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях для каждого года указанного периода. Реанализы и данные наблюдений (см. гл. 1.1.1) представлены черными кривыми для глобальной температуры (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2), светло-серыми для территории Российской Федерации (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2; CRU TS; DEL), темно-серыми для АЗРФ (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2; CRU TS; DEL). Источники данных наблюдений и реанализов на рисунке не идентифицированы, но позволяют составить представление о разбросе этих данных для разных областей осреднения*

Сопоставление средних годовых оценок изменения приземной температуры воздуха по всей территории Российской Федерации в XXI веке, рассчитанных по ансамблю моделей CMIP5, сценарии RCP (Росгидромет, 2014) с соответствующими оценками по ансамблю CMIP6, сценарии SSP (Катцов и др., 2022), указывает на систематически более теплый будущий климат по оценкам моделей последнего поколения при некотором увеличении межмодельного разброса (табл. 1.2.2.1).

***Таблица 1.2.2.1***

*Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха (°С) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения на территории России в середине (2041-2060 гг.) и конце (2080-2099[1]/2081-2100 гг.) XXI века по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг., полученные для сценариев RCP4.5/SSP2-4.5 и RCP8.5/SSP5-8.5 по ансамблям моделей CMIP5 и CMIP6, соответственно*

| Ансамбль моделей, сценарий | 2041–2060 гг. | 2080–2099 / 2081–2100 гг. |
|---|---|---|
| CMIP5 RCP4.5 | 2,1±0,8 | 3,1±1,0 |
| CMIP6 SSP2-4.5 | 2,5±0,8 | 3,9±1,1 |
| CMIP5 RCP8.5 | 2,9±0,8 | 6,4±1,4 |
| CMIP6 SSP5-8.5 | 3,3±0,9 | 7,4±1,8 |

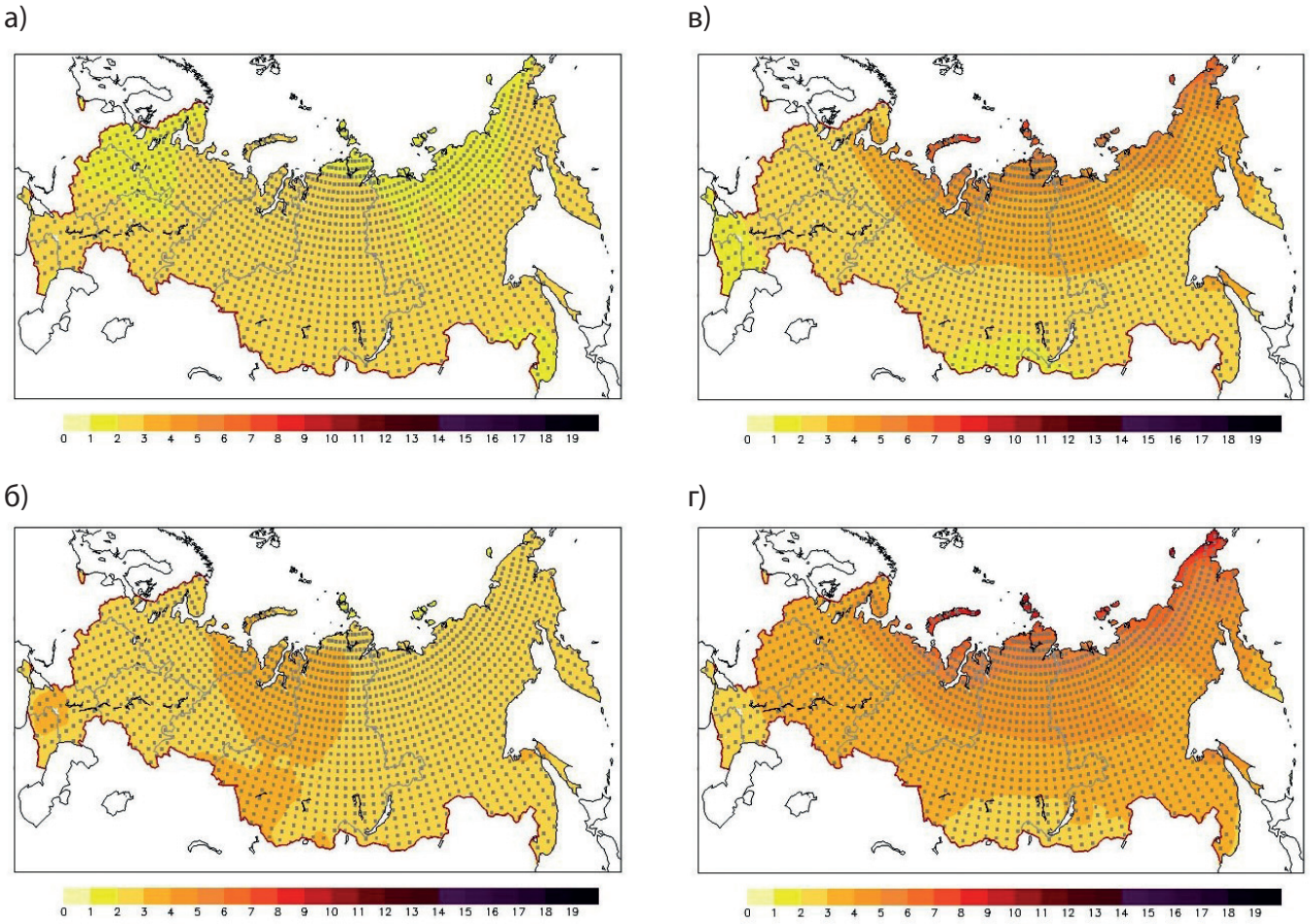



***Рис. 1.2.2.3*** *Изменение средней сезонной температуры приземного воздуха (°С) на территории Российской Федерации в период 2041-2060 гг. по отношению к периоду 1995-2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

[1] Для ансамбля моделей CMIP5 выбран период осреднения 2080–2099 гг., т.к. результаты расчетов некоторых моделей из ансамбля были представлены только по 2099 год.

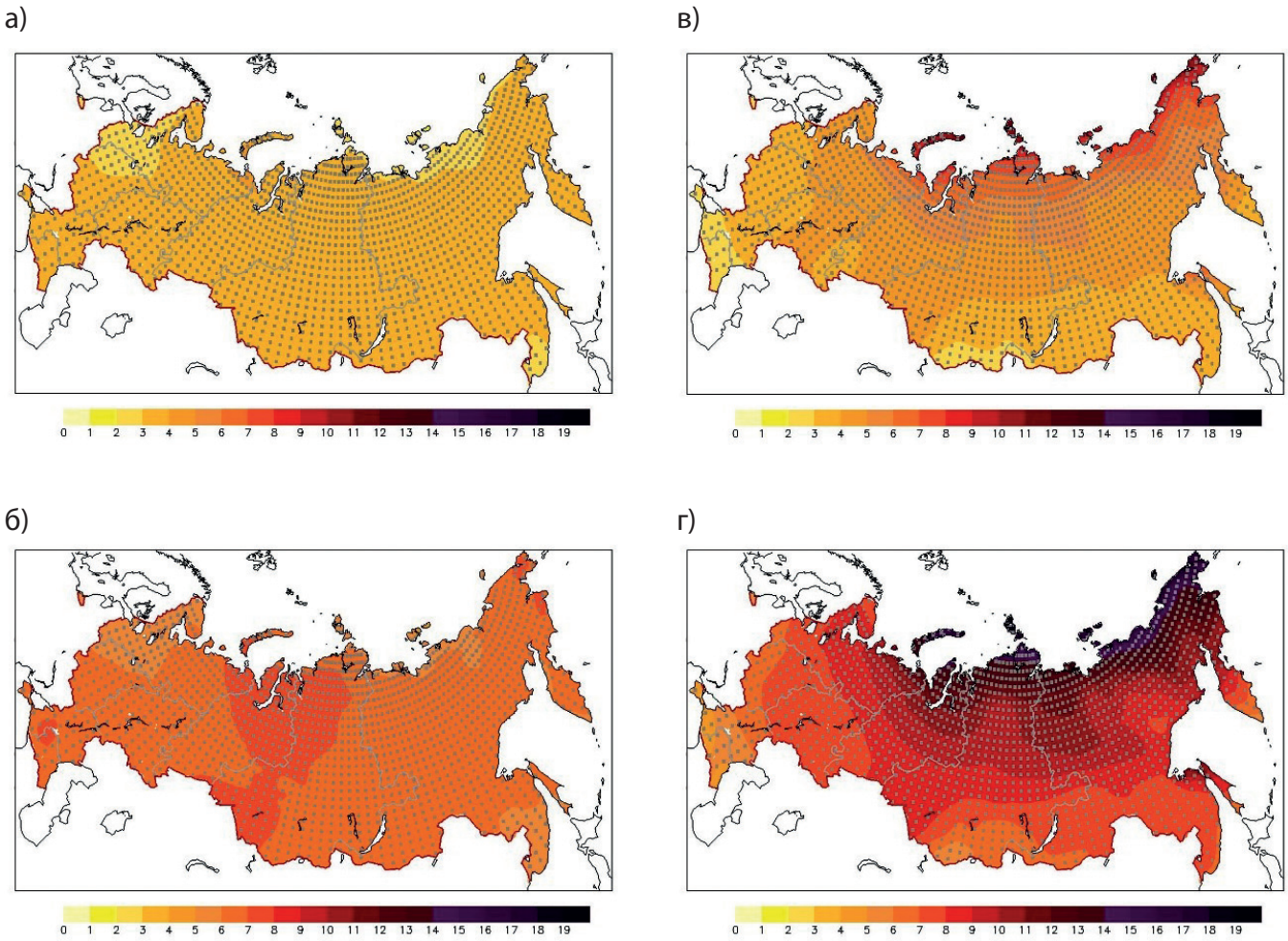



***Рис. 1.2.2.4*** *Изменение средней сезонной температуры приземного воздуха (°С) в период 2081-2100 гг. по отношению к периоду 1995-2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

Рост средней температуры приземного воздуха на протяжении XXI века сопровождается ростом продолжительности волн тепла (рис. 1.2.2.5). При этом рост минимальной суточной температуры приземного воздуха на всей территории страны (рис. 1.2.2.6) практически повсеместно опережает рост максимальной суточной температуры (рис. 1.2.2.7), что приводит к уменьшению средней годовой амплитуды экстремальной (разности максимальной и минимальной суточной) температуры приземного воздуха (рис. 1.2.2.8). Указанные тенденции особенно отчетливо проявляются на территории АЗРФ (табл. 1.2.2.2).

а) б)

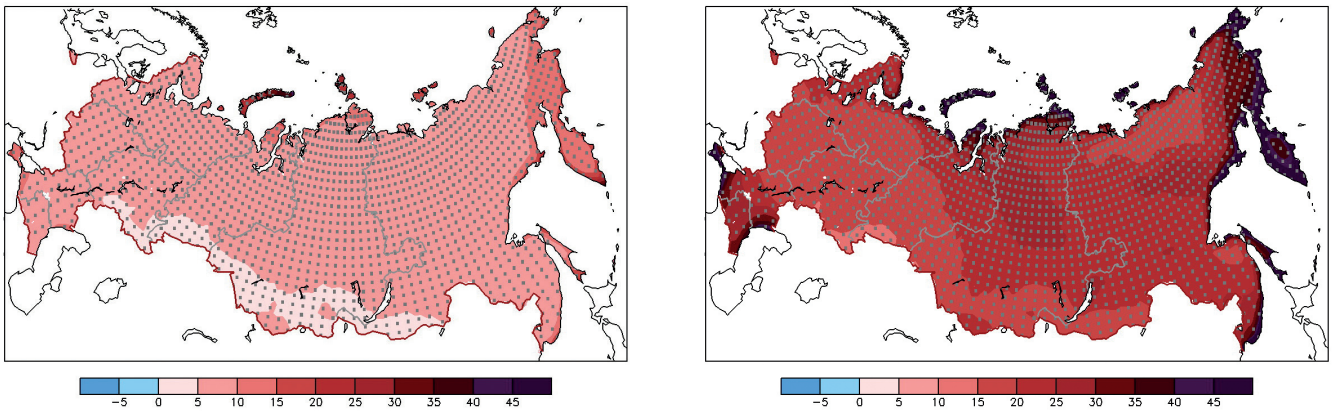



***Рис. 1.2.2.5*** *Изменение средней за 20 лет продолжительности (сут.) максимальной за год волны тепла в теплый период (май – сентябрь) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Волна тепла определяется как период не менее 3 дней, когда максимальная температура больше 90-го процентиля.*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

а) б)

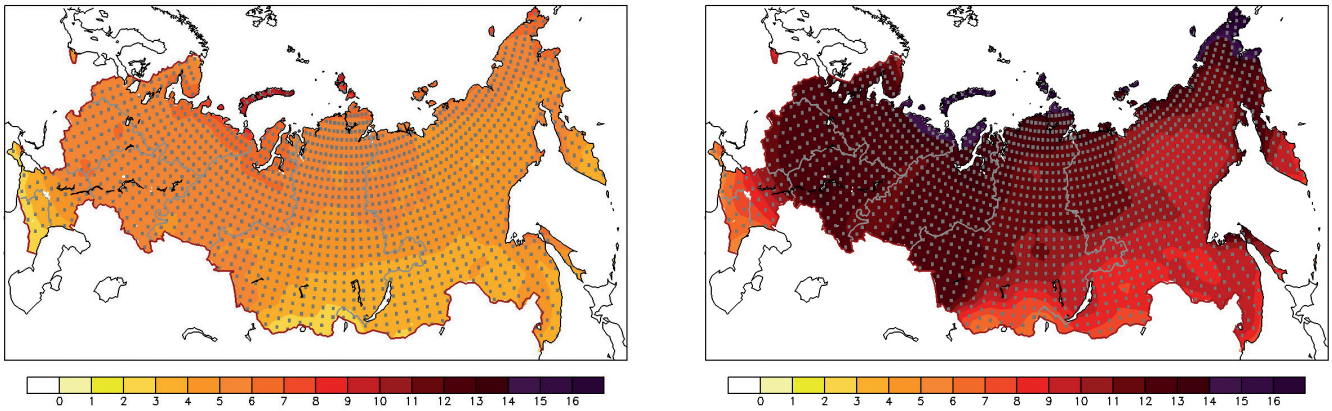



***Рис. 1.2.2.6*** *Увеличение средней за 20 лет минимальной суточной температуры приземного воздуха (°C) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

а) б)

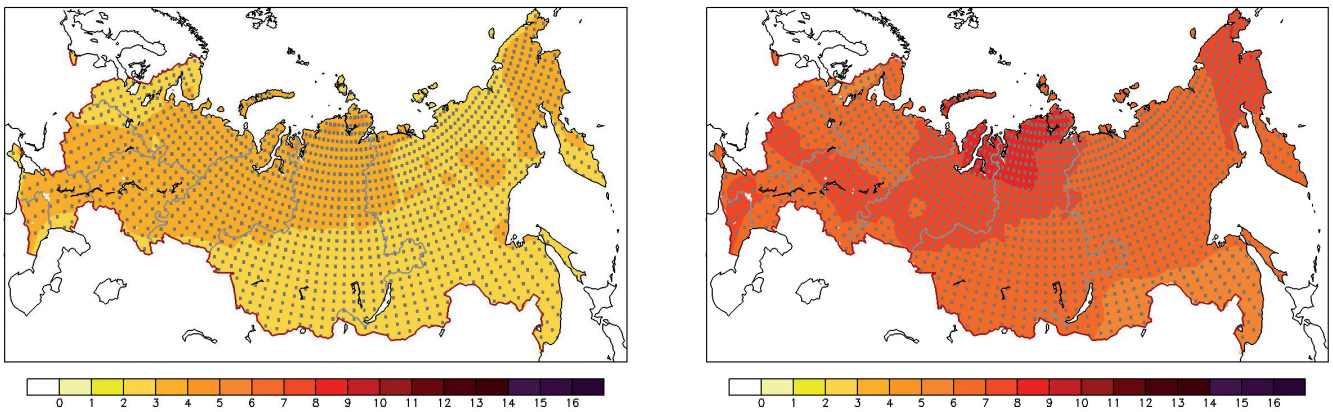



***Рис. 1.2.2.7*** *Увеличение средней за 20 лет максимальной суточной температуры приземного воздуха (°С) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

а) б)

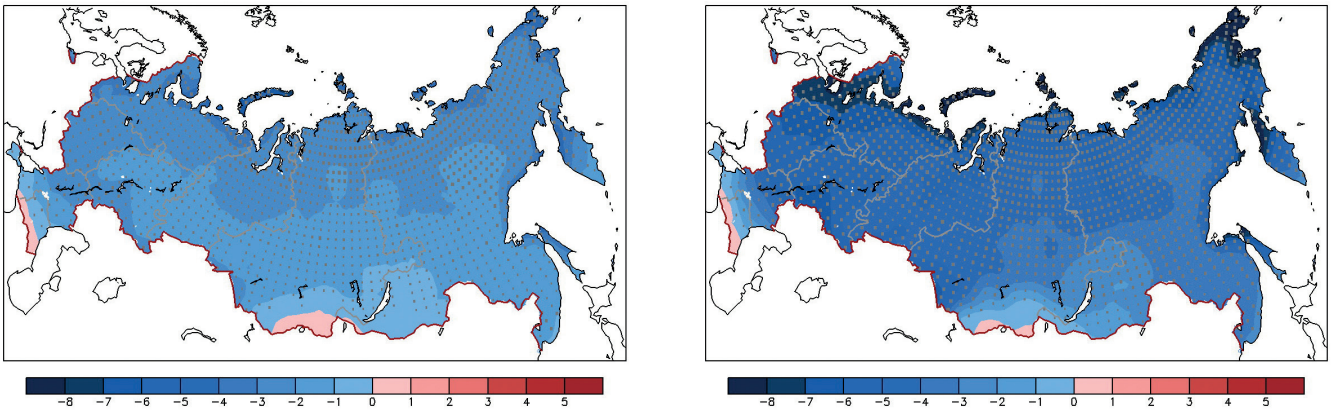



***Рис. 1.2.2.8*** *Изменение средней за 20 лет годовой амплитуды экстремальной (разности максимальной и минимальной суточной) температуры приземного воздуха (°С) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает единицу*

***Таблица 1.2.2.2***

*Изменение средних за 20 лет характеристик экстремальности термического режима и соответствующие межмодельные стандартные отклонения в середине (2041-2060 гг.) и конце (2081-2100 гг.) XXI века по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5), полученные по ансамблю из 28 моделей CMIP6 для территории Российской Федерации (РФ) в целом и ее Арктической зоны (АЗРФ)*

| Характеристика | 2041–2060 гг. | | 2081–2100 гг. | |
|---|---|---|---|---|
| | РФ | АЗРФ | РФ | АЗРФ |
| Продолжительность максимальной за год волны тепла в теплый период (май – сентябрь), сут. | 7 ± 3 | 9 ± 4 | 24 ± 10 | 27 ± 10 |
| Минимальная суточная температура приземного воздуха, °С | 4,9 ± 1,6 | 5,6 ± 1,9 | 11,2 ± 2,8 | 12,4 ± 3,1 |
| Максимальная суточная температура приземного воздуха, °С | 3,0 ± 1,2 | 3,3 ± 1,4 | 6,8 ± 2,2 | 7,2 ± 2,4 |
| Годовая амплитуда экстремальной (разность максимальной и минимальной суточной) температуры приземного воздуха, °С | –2,0 ± 1,1 | –2,8 ± 1,3 | –4,7 ± 2,0 | –5,9 ± 2,4 |

## 1.2.2.2 Гидрологический режим

### Атмосферные осадки

Среднегодовые атмосферные осадки в среднем по территории Российской Федерации, согласно оценкам моделей CMIP6, демонстрируют устойчивый рост для рассматриваемых сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему (рис. 1.2.2.9). Скорость роста количества осадков на территории Российской Федерации и особенно в ее Арктической зоне превышает скорость роста количества средних глобальных осадков (рис. 1.2.2.10) (Катцов и др., 2022). Эти оценки качественно согласуются с оценками моделей предыдущих поколений и для предыдущих групп сценариев (см. Росгидромет, 2008, 2014).

Средние годовые оценки изменения суммарных осадков по всей территории Российской Федерации в XXI веке в ансамбле сценарных прогнозов CMIP6, так же, как и в случае приземной температуры воздуха (табл. 1.2.2.1), систематически больше, чем оценки ансамбля CMIP5 (табл. 1.2.2.3) (Катцов и др., 2022).

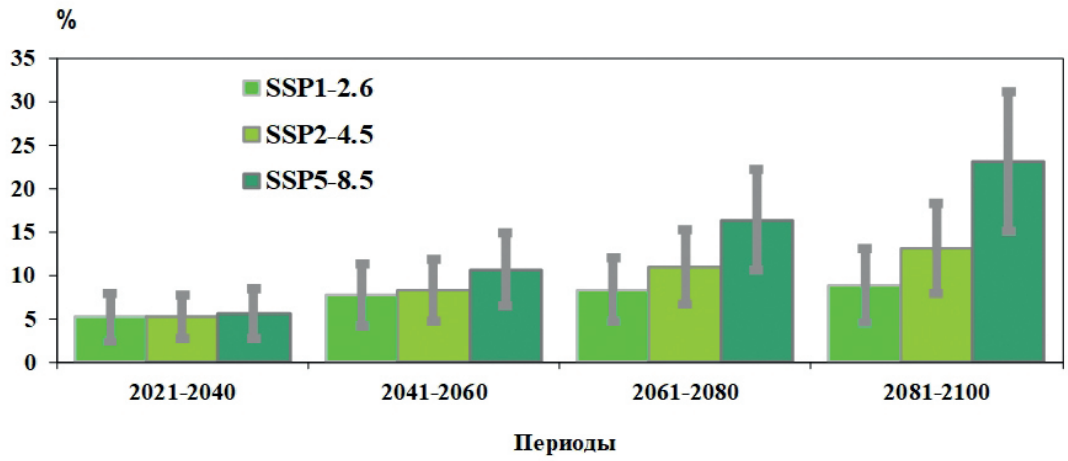



**Рис. 1.2.2.9** *Изменение количества средних годовых осадков (%) на территории Российской Федерации в XXI веке (в среднем за каждое из четырех двадцатилетий: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 гг.) по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях*

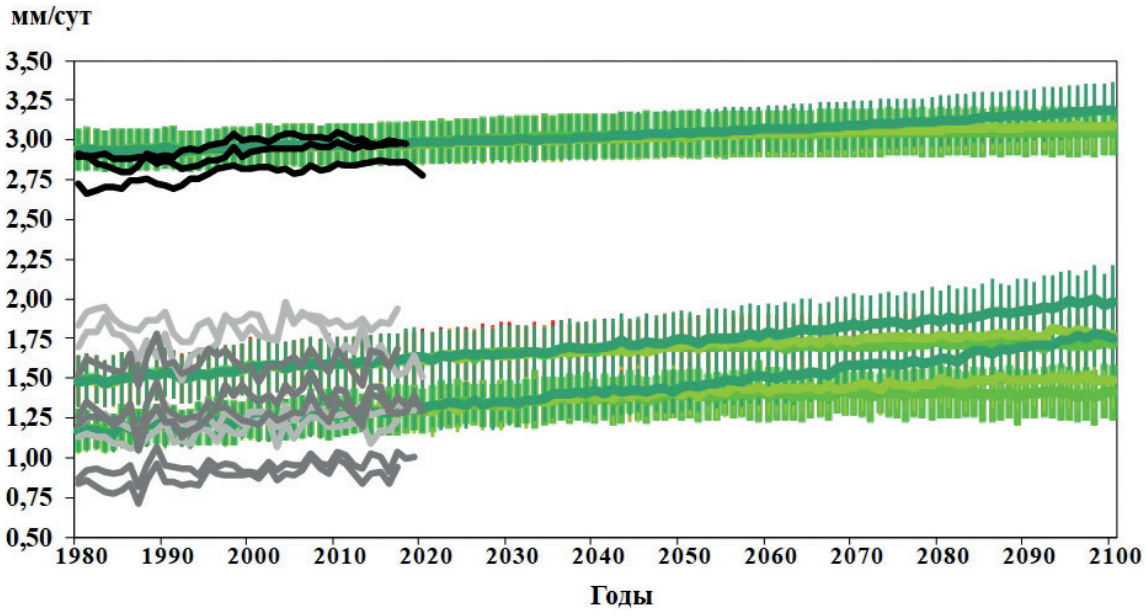



**Рис. 1.2.2.10** *Эволюция средних годовых значений количества атмосферных осадков (мм/сут.): глобальных (вверху), на территории Российской Федерации (в середине) и в Арктической зоне Российской Федерации (внизу) в период 1980-2100 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 1.2.2.9. Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях для каждого года указанного периода. Реанализы и данные наблюдений (см. главу 1.1.1) представлены черными кривыми для глобальных осадков (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2), светло-серыми для территории Российской Федерации (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2; CRU TS; DEL), темно-серыми для АЗРФ (ERA5; NCEP/NCAR; MERRA-2; CRU TS; DEL). Источники данных наблюдений и реанализов на рисунке не идентифицированы, но позволяют составить представление о разбросе этих данных для разных областей осреднения*

***Таблица 1.2.2.3***

*Изменения среднегодовых суммарных осадков (%) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения на территории Российской Федерации в середине (2041-2060 гг.) и конце (2080-2099/2081-2100 гг.) XXI века по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг., полученные для сценариев RCP4.5/SSP2-4.5 и RCP8.5/SSP5-8.5 по ансамблям моделей CMIP5 и CMIP6, соответственно*

| Ансамбль моделей, сценарий | 2041–2060 гг. | 2080–2099 / 2081–2100 гг. |
|---|---|---|
| CMIP5 RCP4.5 | 7±3 | 10±5 |
| CMIP6 SSP2-4.5 | 8±4 | 13±5 |
| CMIP5 RCP8.5 | 9±4 | 20±7 |
| CMIP6 SSP5-8.5 | 11±4 | 23±8 |

На протяжении XXI века ожидается рост количества осадков зимой на всей территории Российской Федерации для всех сценариев (рис. 1.2.2.11 и 1.2.2.12). Согласно наиболее «агрессивному» сценарию SSP5-8.5, в Сибири местами уже к середине XXI века возможен рост осадков в полтора раза относительно базового периода.

В летний сезон рост среднего количества осадков ожидается на большей части территории Российской Федерации, за исключением южных регионов, где к концу XXI века ожидается уменьшение количества осадков до 25% относительно базового периода.

В целом эта картина также согласуется с ранее полученными оценками (см. Росгидромет, 2008, 2014).

Среди характеристик экстремальности гидрологического режима одними из часто используемых являются максимальная продолжительность непрерывных периодов с осадками менее установленного значения (например, менее 1 мм/сут.), а также максимальная сумма осадков за сутки. Увеличение длительности периодов с малыми суточными суммами осадков в теплое время года обычно указывает на рост засушливости климата, а увеличение максимальной суммы осадков приводит к росту опасности наводнений.

На юге Российской Федерации увеличивается максимальная продолжительность сухого периода (непрерывных периодов с осадками менее 1 мм/сут.) как в середине XXI века, так и в более долгосрочной перспективе (рис. 1.2.2.13). Аналогичные оценки были получены ранее (Росгидромет, 2008, 2014). При этом на остальной части территории Российской Федерации, в особенности в Сибири, ожидаются противоположные тенденции – продолжительность таких периодов сокращается.

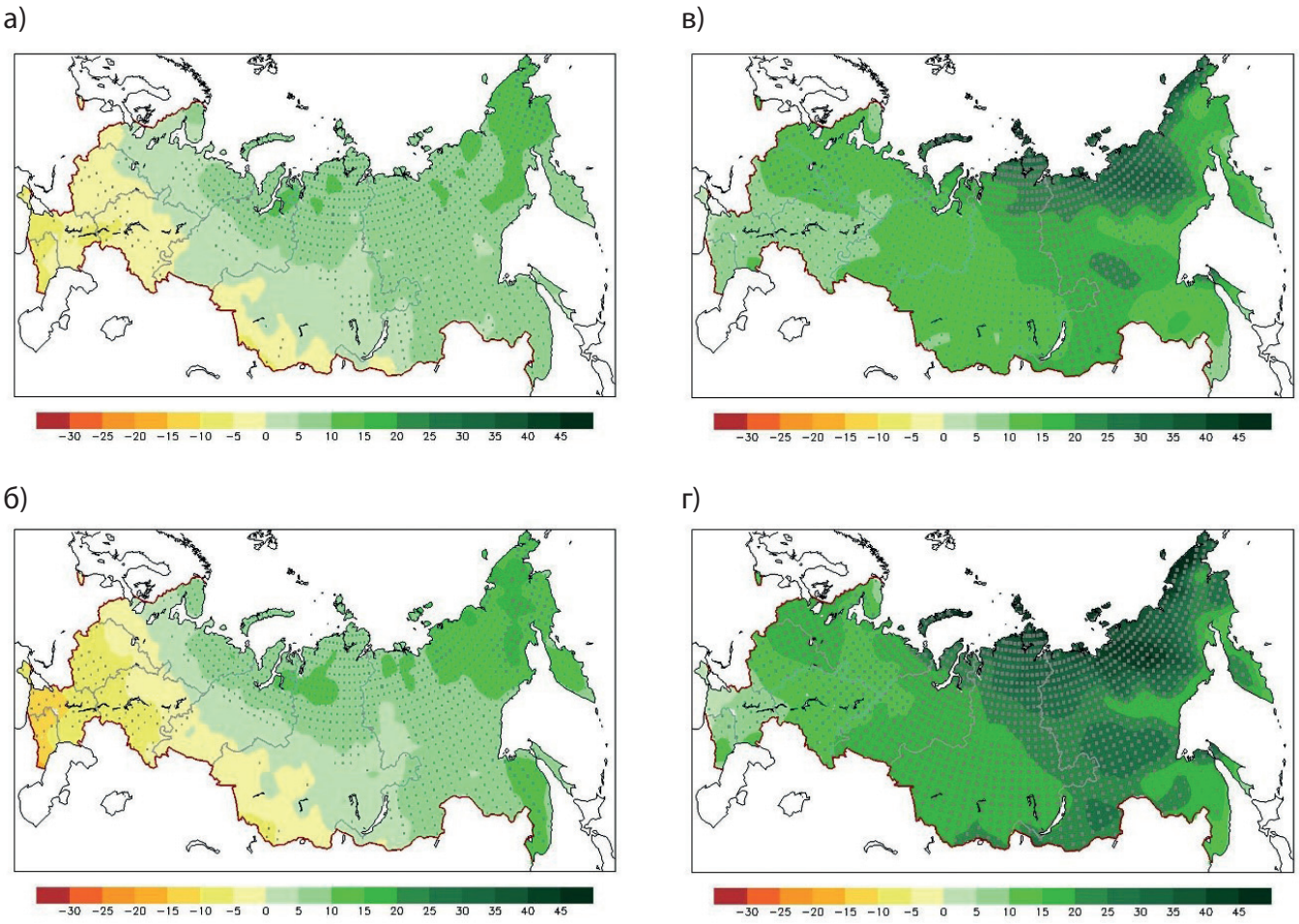



***Рис. 1.2.2.11*** *Изменение количества средних сезонных осадков (%) в период 2041-2060 гг. по отношению к периоду 1995-2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей*

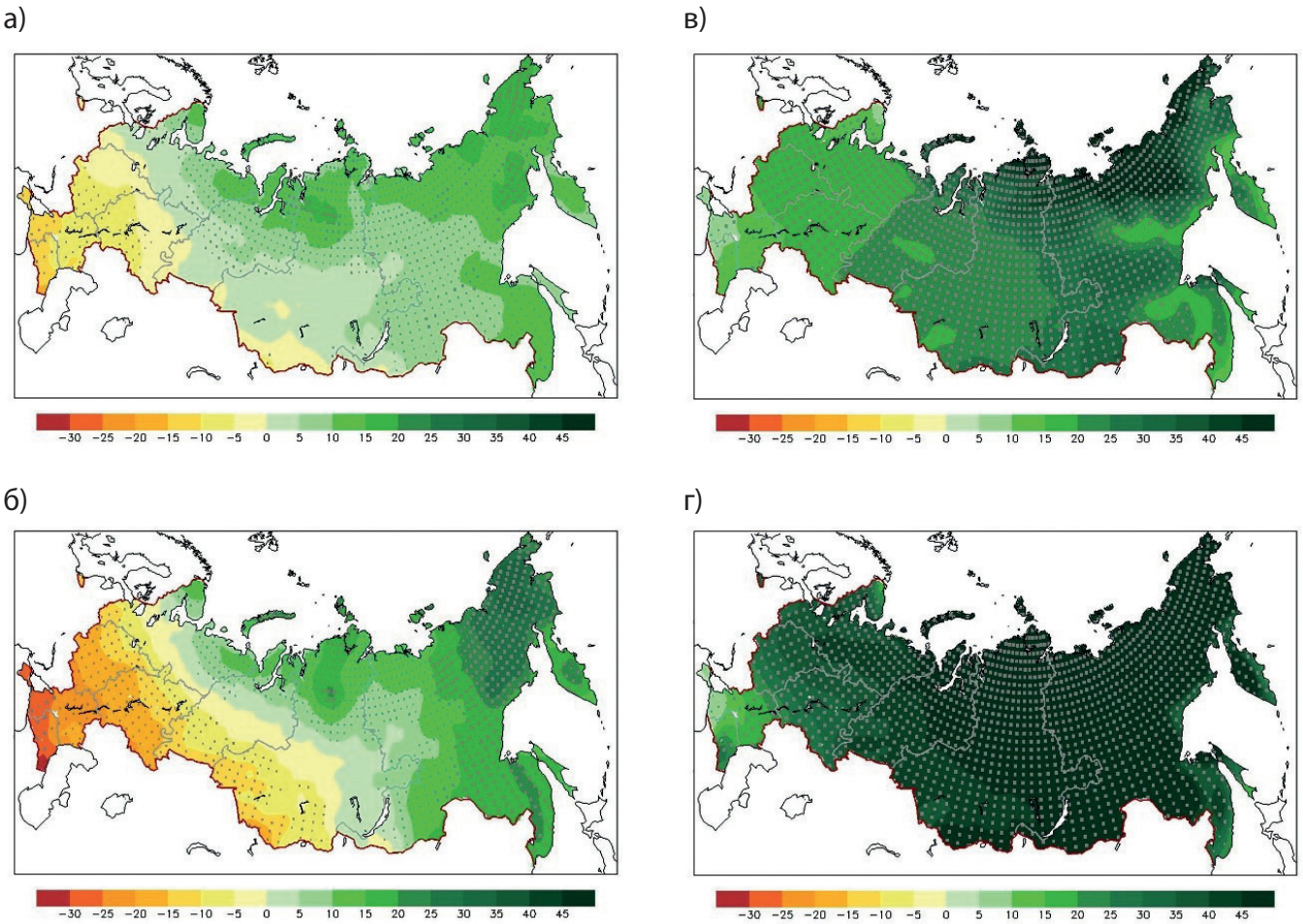



***Рис. 1.2.2.12*** *Изменение количества средних сезонных осадков (%) в период 2081-2100 гг. по отношению к периоду 1995-2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*

*Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей*

Сокращение сухих периодов для наиболее агрессивного сценария SSP5-8.5 в среднем по всей территории Российской Федерации составляет к середине XXI века два дня, к концу века – три дня, а для АЗРФ, соответственно, – три и шесть суток (табл. 1.2.2.4).

На всей территории Российской Федерации ожидается рост максимальной в году суточной суммы осадков (рис. 1.2.2.14), особенно на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири. В середине и в конце XXI века рост максимальных осадков в среднем по территории Российской Федерации составит, соответственно, 12 и 27% относительно их величин в базовом периоде (табл. 1.2.2.4). Для территории АЗРФ соответствующие оценки достигают 15 и 33%.

При этом максимальные суммы осадков в южной части территории Российской Федерации могут возрастать в XXI веке на фоне уменьшения ее влагообеспеченности в летний сезон (Росгидромет, 2014).

а) б)

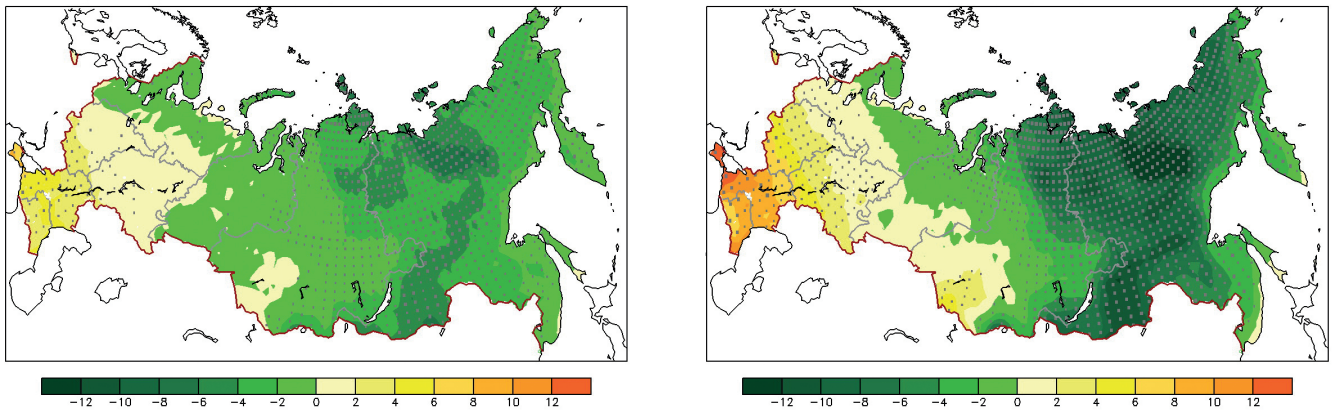



***Рис. 1.2.2.13*** *Изменение средней за 20 лет максимальной продолжительности сухого периода (дни) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. для сценария SSP5-8.5 по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – регионы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей*

а) б)

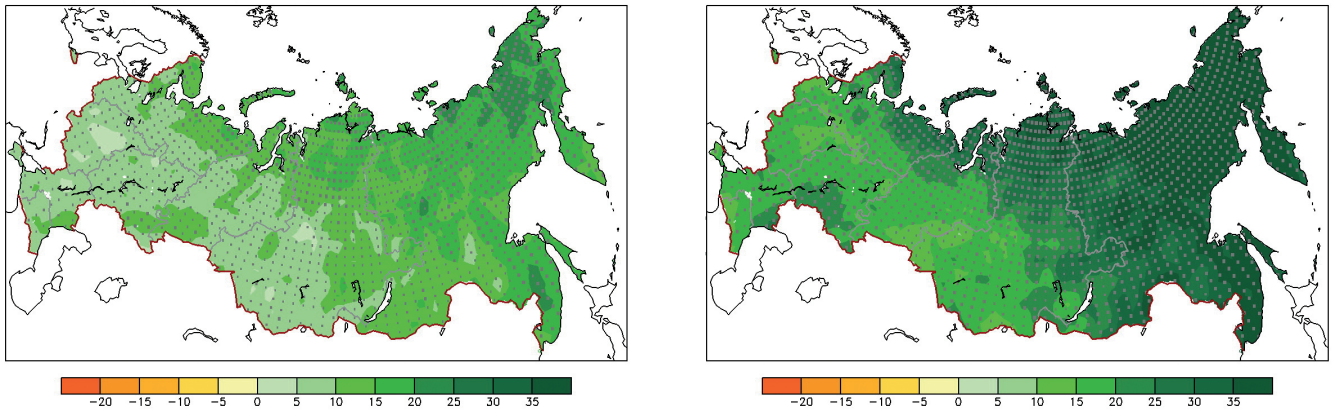



***Рис. 1.2.2.14*** *Изменение средней за 20 лет максимальной за год суточной суммы осадков (%) к середине (а) и концу (б) XXI века по отношению к периоду 1995-2014 гг. для сценария SSP5-8.5 по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6*

*Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – регионы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей*

***Таблица 1.2.2.4***

*Изменение средних за 20 лет характеристик экстремальности гидрологического режима и соответствующие межмодельные стандартные отклонения в середине (2041-2060 гг.) и конце (2081-2100 гг.) XXI века по отношению к базовому периоду1995-2014 гг. (сценарий SSP5-8.5), полученные по ансамблю из 28 моделей CMIP6 для территории Российской Федерации (РФ) и ее Арктической зоны (АЗРФ)*

| Характеристика | 2041–2060 гг. | | 2081–2100 гг. | |
|---|---|---|---|---|
| | РФ | АЗРФ | РФ | АЗРФ |
| Максимальная продолжительность непрерывных периодов с осадками менее 1 мм/сут., сут. | –2 ± 1 | –3 ± 1 | –3 ± 2 | –6 ± 2 |
| Максимальная суточная сумма осадков за один день, мм/сут. | 2,9 ± 1,0 | 3,0 ± 0,9 | 6,6 ± 1,9 | 6,8 ± 1,8 |
| Максимальная суточная сумма осадков за один день, %. | 12 ± 4 | 15 ± 5 | 27 ± 8 | 33 ± 8 |

**Локальный сток**

В качестве характеристики локального стока используется среднее многолетнее значение разности осадков и испарения, рассчитанное по ансамблю моделей CMIP6 (табл. 1.2.2.5 и рис. 1.2.2.15). На большинстве водосборов рек (частично или полностью находящихся на территории Российской Федерации) ожидаемые изменения стока к середине XXI века не превышают межмодельный разброс (табл. 1.2.2.5). Исключение составляют три водосбора – крупные водосборы Лены и Енисея, а также рек северо-востока АТР, на которых ожидается рост годового стока. К концу XXI века к водосборам, на которых средний рост локального стока превышает межмодельный разброс, по крайней мере для сценария SSP5-8.5, добавляется еще и совокупность северных рек. Что касается южных рек, то, несмотря на значительный межмодельный разброс на протяжении всего XXI века, в среднем они демонстрируют тенденцию к уменьшению локального стока.

Как и в случае со средними изменениями температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков, общая картина для территории Российской Федерации согласуется с ранее полученными оценками (Росгидромет, 2008, 2014).

***Таблица 1.2.2.5***

*Средние изменения годового стока (%) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения в середине (2041-2060 гг.) и конце (2081-2100 гг.) XXI века по отношению к базовому периоду 1995-2014 гг., полученные по ансамблям моделей CMIP6 для разных сценариев радиационного воздействия*

| Водосбор | 2041–2060 гг. | | 2081–2100 гг. | |
|---|---|---|---|---|
| | SSP2-4.5(32) | SSP5-8.5(33) | SSP2-4.5(32) | SSP5-8.5(33) |
| Волга | –1 ± 10 | –3 ± 11 | 0 ± 9 | 1 ± 16 |
| Обь | 0 ± 7 | 1 ± 7 | 3 ± 10 | 4 ± 13 |
| Енисей | 5 ± 5 | **7 ± 6** | **9 ± 8** | **17 ± 12** |
| Лена | **11 ± 9** | **15 ± 10** | **16 ± 13** | **38 ± 22** |
| Амур | 7 ± 10 | 10 ± 10 | **14 ± 13** | **27 ± 15** |
| Северные реки | 4 ± 7 | 5 ± 6 | 5 ± 6 | **13 ± 11** |
| Южные реки | –8 ± 14 | –9 ± 16 | –3 ± 23 | –10 ± 26 |
| Северо-восток АТР | **15 ± 10** | **20 ± 11** | **23 ± 13** | **50 ± 23** |
| Балтика | 3 ± 7 | 4 ± 7 | 3 ± 7 | 10 ± 11 |

*Жирным шрифтом выделены изменения, которые превышают по абсолютной величине стандартные отклонения (межмодельный разброс). В скобках рядом с названием сценария указано число моделей в ансамбле. Наряду с водосборами отдельных крупных рек (Волга, Енисей, Лена, Обь и Амур) показаны водосборы Балтийского моря («Балтика») и укрупненные области стока, включающие водосборы северных (Мезень, Сев. Двина, Онега и Печора) и южных (Днепр, Дон, Днестр и Кубань) рек, а также рек северо-востока АТР (Индигирка, Яна, Колыма, и Анадырь)*

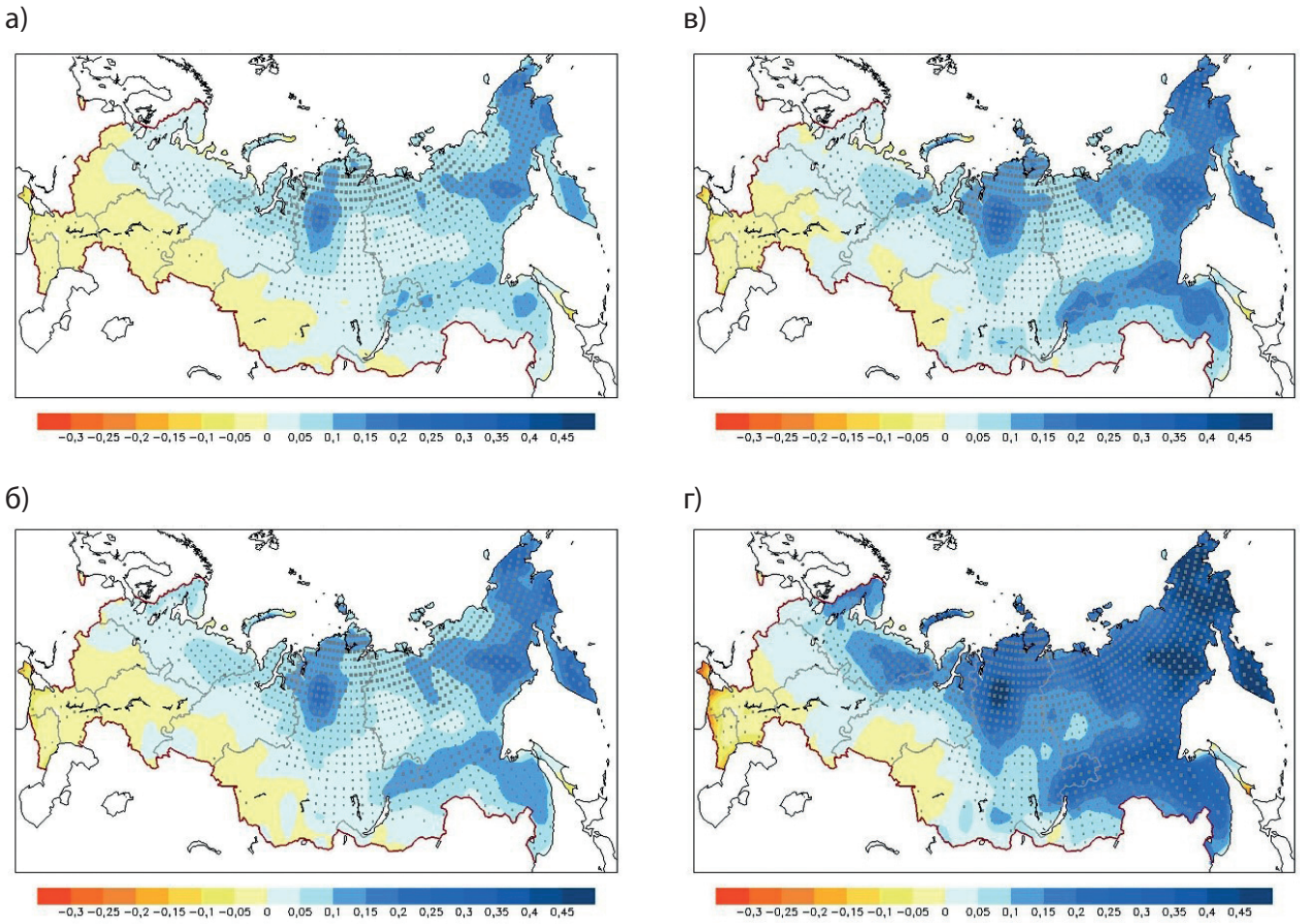



***Рис. 1.2.2.15*** *Изменения среднегодовых разностей осадков и испарения (мм/сут.) в периоды 2041-2061 гг. (а, б) и 2081-2100 гг. (в, г) по отношению к периоду 1995-2014 гг. для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно*
*Мелкими точками показаны регионы, где более 66% моделей дают одинаковый знак изменений, крупными – районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90% моделей*

### 1.2.2.3 Криосфера

**Снежный покров суши**

Оценки будущих изменений снежного покрова суши (СПС), полученные в ансамбле моделей CMIP6, показывают, что площадь СПС на территории Российской Федерации в XXI веке будет сокращаться, причем до середины XXI века по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 скорость сокращения примерно одинакова (рис. 1.2.2.16). Во второй половине XXI века для сценария SSP5-8.5 скорость сокращения площади СПС существенно возрастает. Так, к концу столетия по сценарию SSP2-4.5 сокращение СПС на территории Российской Федерации составит для среднегодовой площади 13 ± 4% по отношению к среднегодовой площади СПС за период 1995-2014 гг., при реализации сценария SSP5-8.5 среднегодовая площадь СПС сократится на 25 ± 7%. Уменьшение площади СПС в марте составит 5 ± 3% и 13 ± 7%, в апреле – 13 ± 6% и 28 ± 10% для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно (Катцов и др., 2022).

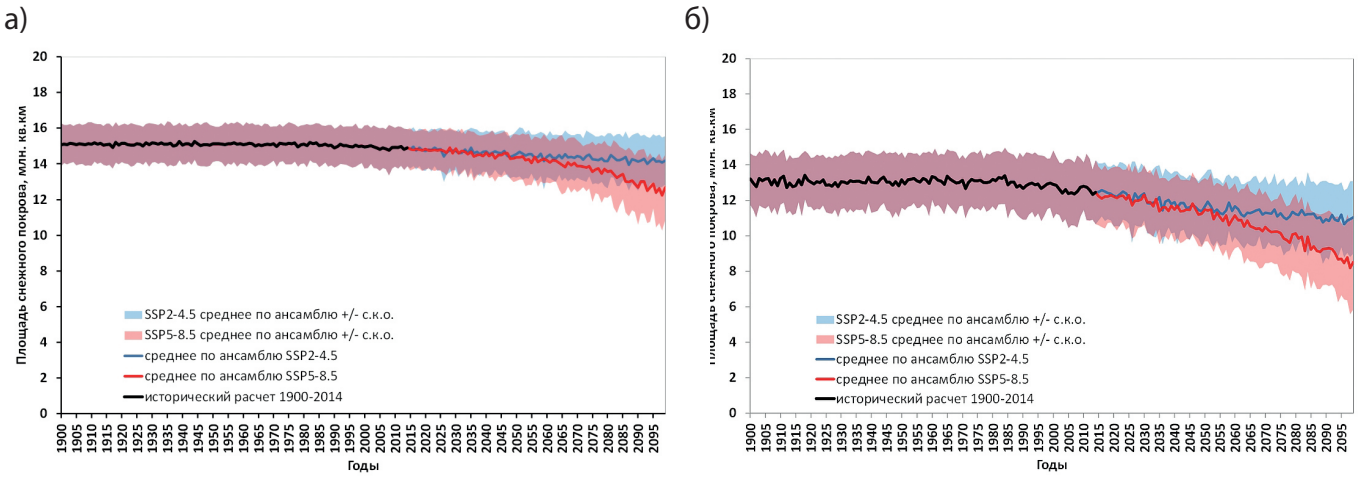



***Рис. 1.2.2.16*** *Эволюция площади снежного покрова (млн км$^2$) в XX-XXI веках (сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5) для территории Российской Федерации в марте (а) и апреле (б)*

Изменения накопленной за зиму массы снега определяются влиянием двух факторов: изменениями температуры воздуха и изменениями количества осадков в холодный период. В целом, картина будущих изменений массы снега, рассчитанная по ансамблю моделей CMIP6, согласуется с ранее полученными оценками. Повышение зимней температуры и увеличение количества зимних осадков приведут к тому, что зимой в более холодных регионах будет увеличиваться снегонакопление, а в менее холодных регионах оно будет уменьшаться, так как часть осадков будет выпадать в жидкой форме (Росгидромет, 2014).

**Многолетняя мерзлота**

Расчеты термического состояния грунтов, выполненные с помощью модели теплопереноса в грунтах ГГО (Malevsky-Malevich et al., 2001) с использованием в качестве входных данных результатов моделирования полей температуры поверхности и высоты снежного покрова, полученных в ансамбле моделей CMIP6, показали, что при условии реализации сценария SSP5-8.5 к концу XXI века произойдет существенное смещение границ зоны многолетней мерзлоты к северу, кроме того, практически не останется таких областей, в которых приповерхностная мерзлота сохранялась бы во всех модельных расчетах (рис. 1.2.2.17) (Катцов и др., 2022).

Согласно сценарным прогнозам, площадь, занятая приповерхностной многолетней мерзлотой на территории Российской Федерации, сократится к середине XXI века по сравнению с базовым периодом 1995-2014 гг. на 22±7% для сценария SSP2-4.5 и на 28±10% для сценария SSP5-8.5, в конце XXI века сокращение составит 40±15% и 72±20% для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно.

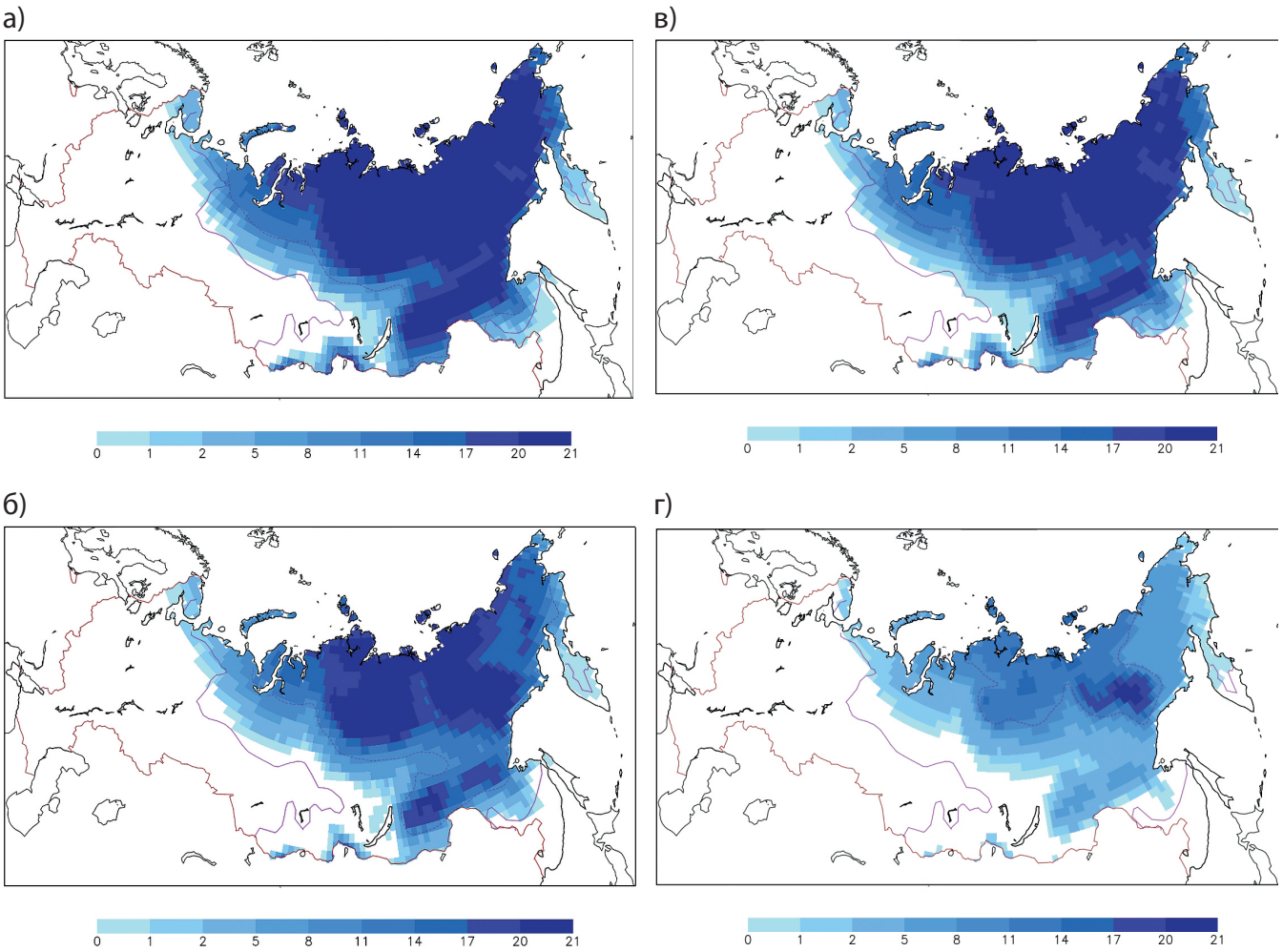



***Рис. 1.2.2.17*** *Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы, для середины (а, в) и конца (б, г) XXI века по данным расчетов по ансамблю из 21 климатической модели по двум сценариям SSP2-4.5 (а, б) и SSP5-8.5 (в, г)*

*Расчеты выполнены для суглинков умеренной влажности. В каждой ячейке сетки 1°×1° различными цветами показано число моделей, в которых для этой ячейки осредненная за период 2041-2060 (а, в) и 2080-2099 (б, г) гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3,3 м не превышает 0 °С. Фиолетовая пунктирная линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0 °С на глубине 3,3 м, осредненной по ансамблю моделей, фиолетовая сплошная линия – наблюдаемая граница многолетней мерзлоты (Nelson et al., 2003)*

**Арктический морской лед**

Для сценария SSP1-2.6 площадь морского льда в Арктике практически стабилизируется во второй половине XXI века, хотя и для данного сценария есть модели, по расчетам которых ледяной покров Северного Ледовитого океана становится сезонным уже к середине XXI века. По сравнению с CMIP5 (RCP8.5), по ансамблю CMIP6 скорость сокращения площади арктического морского льда летом в XXI веке для сценария SSP5-8.5 несколько большая, а межмодельный разброс, наоборот, стал меньше, хотя и остается по-прежнему значительным (Катцов и др., 2022).

К концу XXI века в арктических морях (Карское, Лаптевых, Восточно- Сибирское, Чукотское)

морской лед в годовом минимуме (сентябрь) исчезает по оценкам подавляющего большинства (90%) представленных на рис. 1.2.2.18 моделей CMIP6 для сценария SSP5-8.5 и по оценкам примерно двух третей моделей при условии реализации сценария SSP2-4.5. По сценарию SSP1-2.6 лишь около трети моделей прогнозирует исчезновение морского льда в сентябре.

При этом в зимний период сокращение площади морского льда в Арктике на протяжении XXI века не столь велико (ср., в частности, рис. 1.2.2.19а(б) и в(г)).

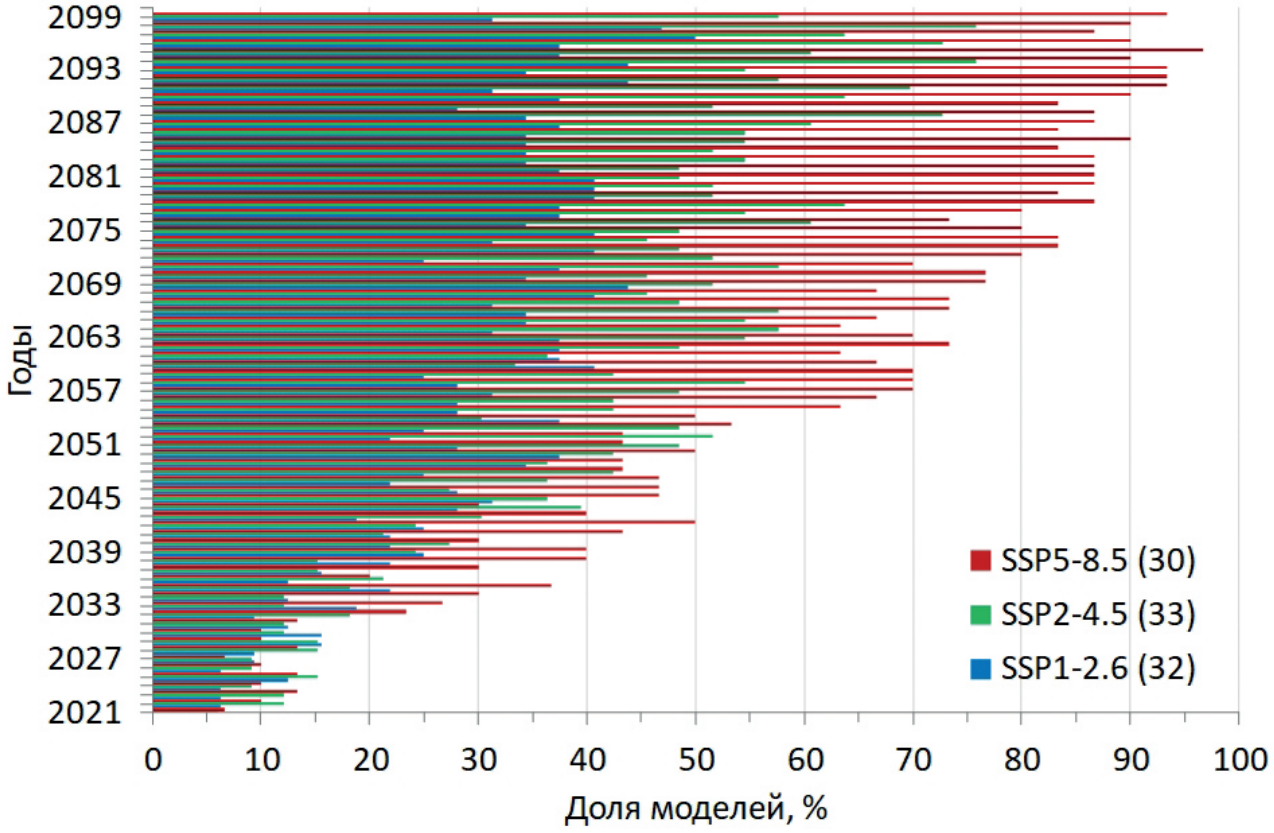



***Рис. 1.2.2.18*** *Доля моделей (в процентах от общего числа моделей в ансамбле) CMIP6, в расчетах которых в сентябре 2021-2099 гг. арктические моря (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) становятся безледными по данным 32 моделей для сценария SSP1-2.6, 33 моделей для сценария SSP2-4.5 и 30 моделей для сценария SSP5-8.5*

Сравнение средних оценок изменения площади морского льда в сентябре и в марте в XXI веке, рассчитанных по ансамблю моделей CMIP5 (сценарии RCP4.5, RCP8.5), с соответствующими оценками по ансамблю CMIP6 (сценарии SSP2-4.5, SSP5-8.5) для арктических морей Российской Федерации (рис. 1.2.2.19) указывает на большее сокращение площади морского льда для сценариев SSP. Межмодельный разброс в ансамбле моделей CMIP6 меньше (за исключением оценок площади морского льда в марте в конце XXI века).

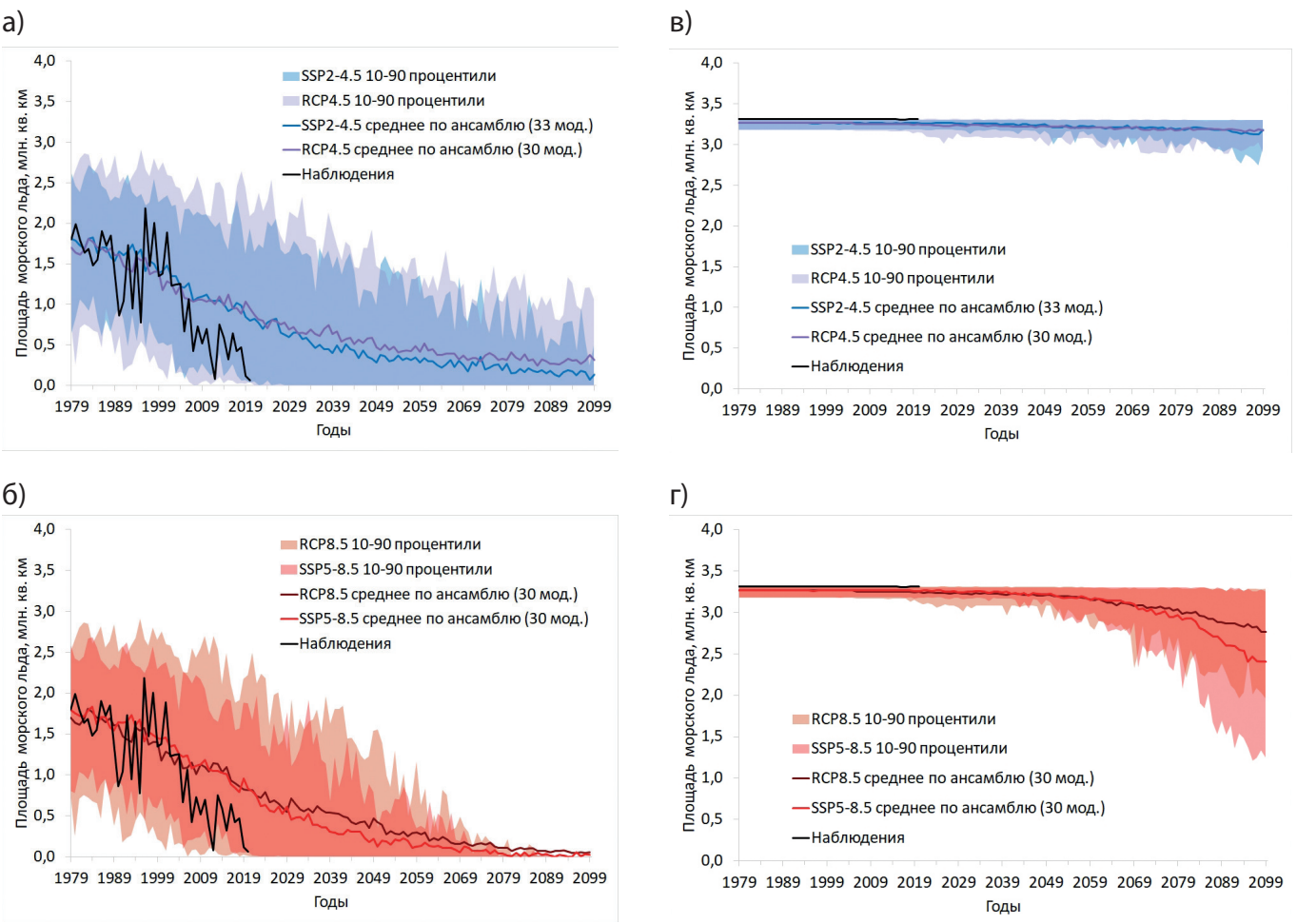



***Рис. 1.2.2.19*** *Эволюция площади морского льда в период 1979-2099 гг. в арктических морях (моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) в сентябре (а, б) и марте (в, г) по данным моделей CMIP5 и CMIP6 для сценариев: (а, в) RCP4.5 (30 моделей) и SSP2-4.5 (33 модели); (б, г) RCP8.5 и SSP5-8.5 (по 30 моделей), а также межмодельный разброс в пределах 10-го и 90-го процентилей*

*Для периода 1979-2005 гг. для CMIP5 и 1979-2014 гг. для CMIP6 в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный расчет. Для периода 1979-2020 гг. приводится наблюдаемая площадь льда по данным HadISST (Rayner et al., 2003 с последующим обновлением) (черная линия). Площадь морского льда рассчитана как сумма площадей модельных ячеек, в которых среднемесячная концентрация морского льда составляет не менее 15%*

### 1.2.2.4 Сценарное прогнозирование регионального климата для планирования адаптации

Влияние глобального потепления на климат Российской Федерации в XXI веке будет выражаться в формировании в большинстве регионов все более теплого и влажного климата. Повышение средних зимних температур и рост количества осадков в традиционно «холодных» районах страны (северный Урал, Центральная и Восточная Сибирь) повлекут за собой увеличение весеннего снегозапаса и, как следствие, осложнят паводковую обстановку на водосборах крупнейших рек в период снеготаяния. В южной части территории Российской Федерации будет нарастать засушливость и усилится влияние экстремально

высоких температур и экстремальных осадков в летний период. Деградация многолетней мерзлоты и ряд последствий сокращения морского ледяного покрова в Арктике способны оказать существенное воздействие на население, экосистемы и отрасли экономики страны, прежде всего, в АЗРФ.

В целом, согласно расчетам с моделями CMIP6 для сценариев семейства SSP, оценки ожидаемых изменений климата на территории Российской Федерации в XXI веке качественно согласуются с оценками, полученными ранее (см. Росгидромет, 2008, 2014) для сценариев SRES (Nakićenović et al., 2000) и RCP (van Vuuren et al., 2011). Все это указывает на высокую степень устойчивости оценок изменений климата на территории России.

Вместе с тем вопрос применимости полученных на основе расчетов с глобальными моделями оценок будущих региональных изменений климата в практических целях, в том числе при планировании тех или иных мер адаптации к изменениям климата в отраслевом и региональном разрезах, по-прежнему остается актуальным. Во многих случаях даже для одних и тех же сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему разброс модельных результатов для территории Российской Федерации существенно превышает средние по ансамблю изменения. Из-за неопределенностей оценок будущих изменений климата, связанных помимо прочего, с недостатком вычислительных ресурсов, выводы о последствиях изменения климата и необходимых адаптационных мероприятиях носят зачастую качественный характер и не могут обеспечить решение многих задач управления рисками, что необходимо для устойчивого развития экономики (Катцов, 2015).

Для оценки последствий изменения климата по результатам моделирования, необходимы пространственно-временная детализация климатических прогнозов, а также массовые расчеты климата, обеспечивающие надежное статистическое описание ожидаемых изменений климатических характеристик.

Все это, с одной стороны, указывает на растущую востребованность и расширяющуюся область применения технологий ансамблевого сценарного прогнозирования климата с высоким разрешением для ограниченных территорий (Катцов и др., 2020), а с другой – позволяет говорить о назревшей потребности в качественном скачке в развитии сценарного прогнозирования глобальной климатической (земной) системы, который, помимо прочего, невозможен без очень значительного увеличения доступных для исследований климата вычислительных ресурсов (Slingo et al., 2021; Slingo, 2022).

## Список литературы


**Катцов В. М., 2015:** Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра. В сб. Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. – СПб.: Д Арт. – С. 66-80.

**Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2022:** Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды ГГО. – Вып. 604. – С. 5-54.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / (Бедрицкий А. И. и др., ред.). – М.: Росгидромет, том 1, 230 с. и том 2, 291 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2016:** Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development, v. 9, pp. 1937-1958, https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

**Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., Shklyarevich O. B., 2001:** Numerical simulation of permafrost parameters distribution // Cold Regions Science and Technology, № 32, pp. 1-11.

**Nakićenović N., Alamo J., Davis G., De Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T. Y., Kram T., La Rovere E. L., Michealis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000:** IPCC Special Report on Emission Scenarios – Cambridge University Press, Cambridge, UK. 599 pp.

**Nelson F. E., Brigham L. W., Hinkel K. M., Parker W., Romanovsky V. E., Shiklomanov N. I., Smith O., Tucker W., Vinson T., Cole D. M., Klene A. E., Lee W., Saxton A., 2003:** Climate change, permafrost, and impacts on civil infrastructure / Special Report 01-03, U. S. Arctic Research Commission, Arlington, Virginia.

**O'Neill B., Carter T., Ebi K., Harrison P., Kemp-Benedict E., Kok K., Kriegler E., Preston B., Riahi K., Sillmann J., van Ruijven B., van Vuuren D., Carlisle D., Conde C., Fuglestvedt J., Green C., Hasegawa T., Leininger J., Monteith S., Pichs-Madruga R., 2020:** Achievements and needs for the climate change scenario framework // Nature Climate Change, v. 10, pp. 1074-1084, doi:10.1038/s41558-020-00952-0.

**Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A., 2003:** Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // Journal of Geophysical Research, v. 108, № D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

**Riahi K., van Vuuren D. P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B. C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Crespo Cuaresma J., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Aleluia Da Silva L., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Strefler J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A., Tavoni M., 2017:** The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview // Global Environmental Change, v. 42, pp. 153-168.

**Slingo J., Baeur P., Bony S., Flato G., Hegerl G., Christensen J. H., Hurrell J., Jakob C., Kattsov V., Kimoto M., Marotzke J., Raghavan K., Shepherd T., Stephens G., Steven B., Stocker T., Sutton R., Zhou T., 2021:** Next generation climate models: a step change for net zero and climate adaptation. Climate change: science and solutions briefings series. The Royal Society, 9 pp. https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climate-science-solutions-modelling.pdf.

**Slingo J., 2022:** Think big and model small // Nature Climate Change, v. 12, June 2022, p. 493. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01399-1

**van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K., 2011:** The representative concentration pathways: An overview // Climatic Change, v. 109 (1), pp. 5-31, doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.

## Модели общей циркуляции атмосферы и океана CMIP6

### *Приложение 1.2.2.1*

*Горизонтальное разрешение атмосферного и океанского компонентов МОЦАО характеризуется шагом сетки в градусах широты/долготы или в виде спектрального усечения (в атмосфере). Вертикальное разрешение (L) определяется числом уровней*

| № | Научная организация, страна | Индекс модели и год создания | Разрешение атмосферного компонента | Разрешение океанского компонента | Hist | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CSIRO-ARCCSS, Австралия | ACCESS-CM2, 2019 | MetUM-HadGEM3-GA7.1 N96 L85, 192×144 | ACCESS-OM2 (GFDL-MOM5) L50, 360×300 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2 | CSIRO, Австралия | ACCESS-ESM1.5, 2019 | HadGAM2 (r1.1, N96) L38, 192×145 | ACCESS-OM2 (MOM5) L50, 360×300 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3 | AWI, Германия | AWI-CM-1.1 MR, 2018 | ECHAM6.3.04p1 T127(0.9°× 0.9°) L95, 384×192 | FESOM1.4 неравномерная сетка (1°×0.2-0.6°) L46 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4 | AWI, Германия | AWI-ESM-1.1 LR, 2018 | ECHAM6.3.04p1 T63 (1.9°×1.9°) L47, 192×96 | FESOM1.4 неравномерная сетка (1°×0.2-0.6°) L46 | ✓ | | | |
| 5 | BCC, Китай | BCC-CSM2-MR, 2017 | BCC_AGCM3_MR T106 (0.8°× 0.8°) L46, 320×160 | MOM4 (1°× 0.3°~1.0°) L40, 360×300 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 6 | BCC, Китай | BCC-ESM1, 2017 | BCC_AGCM3_LR T42(1.4°×2.8°) L26, 128×64 | MOM4 (1°× 0.3°~1.0°) L40, 360×232 | ✓ | | | |
| 7 | CCCMAECC, Канада | CanESM5, 2017 | CanAM5 T63(1.9°×1.9°) L49, 192×96 | NEMO3.4.1(ORCA1,1°×0.3°~1.0°)L40, 362×292 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 8 | CCCMAECC, Канада | CanESM5-CanOE, 2019 | CanAM5 T63(1.9°×1.9°) L49, 192×96 | NEMO3.4.1(ORCA1,1°×0.3°~1.0°)L45, 360×291 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 9 | CAMS, Китай | CAMS-CSM1-0, 2016 | ECHAM5_CAMS T106 (0.8°× 0.8°) L31, 320×160 | MOM4 (1°× 0.3-1.0°) L50, 360×200 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | CAS, Китай | CAS-ESM 2.0, 2019 | IAP AGCM 5.0 (0.7°×1.4°) L35, 256×128 | LICOM2.0 (~0.7°×1°~1.4°) L30, 362×196 | ✓ | | | |
| 11 | NCAR, США | CESM2, 2017 | CAM6 (0.9°×1.25°) L32, 288×192 | POP2(1.1°× 0.3~0.6°) L60, 320×384 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 12 | NCAR, США | CESM2-FV2, 2017 | CAM6 (1.9°×.2.5°) L32, 144×96 | POP2(1.1°× 0.3~0.6°) L60, 320×384 | ✓ | | | |
| 13 | NCAR, США | CESM2-WACCM, 2017 | CAM6 (0.9°×1.25°) L70, 288×192 | POP2(1.1°×0.3~0.6° ) L60, 320×384 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 14 | NCAR, США | CESM2-WACCM-FV2 , 2017 | CAM6 (1.9°×.2.5°) L70, 144×96 | POP2(1.1°× 0.3~0.6°) L60, 320×384 | ✓ | | | |
| 15 | THU, Китай | CIESM, 2019 | CIESMAM1.0CAM5 (0.9°×1.25°)L30, 288×192 | CIESM-OM1.0 POP2(1.1°×0.3~0.6°) L60, 320×384 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 16 | CMCC, Италия | CMCC-CM-SR5, 2016 | CAM5.3(0.9°×1.25°) L30, 288×192 | NEMO3.6, ORCA1deg(~1°x1~0.3°) L50, 362×292 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 17 | CMCC, Италия | CMCC-CM2-HR4, 2016 | CAM4(0.9°×1.25°) L26, 288×192 | NEMO3.6, ORCA0.25 (~0.25°×1~0.3°) L50, 1442×1051 | ✓ | | | |
| 18 | CNRM, Франция | CNRM-CM6-1, 2017 | Arpege 6.3 TL127(1.4°×1.4°) L91, 128×256 | NEMO3.6, ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362×294 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 19 | CNRM, Франция | CNRM-ESM2-1, 2017 | Arpege 6.3 TL127(1.4°×1.4°) L91, 128×256 | NEMO3.6, eORCA1deg (~1°×1~0.3°) L75, 362×294 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 20 | CNRM, Франция | CNRM-CM6-1 HR, 2017 | Arpege 6.3 TL359 L91, 720×360 | NEMO3.6, eORCA025 (0.25°×0.25°) L75, 1442×1050 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | ICHEC, EC | EC-EARTH3, 2019 | IFScy36r4 TL255 (~0.7°×~0.7°) L91, 512×256 | NEMO3.6, ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362×292 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 22 | ICHEC, EC | EC-EARTH3-Veg, 2019 | IFScy36r4 TL255 (~0.7°×~0.7°) L91, 512×256 | NEMO3.6, ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362×292 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 23 | ICHEC, EC | EC-EARTH3-Veg-LR, 2019 | IFScy36r4 TL159 (~0.7°×~0.7°) L62, 320×160 | NEMO3.6, ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362×292 | ✓ | | | |
| 24 | LLNL, США | E3SM 1.0, 2018 | EAM (v1.0, неравномер. сетка 1° в среднем) L72, 360×180 | MPAS-Ocean (v6.0, oEC60to30 неравномерная SVTs сетка, разрешение 50-60 км) L60 | ✓ | | | |
| 25 | LLNL, США | E3SM 1.1, 2019 | EAM (v1.0, неравномер. сетка 1° в среднем) L72, 360×180 | MPAS-Ocean (v6.0, oEC60to30 неравномерная SVTs сетка, разрешение 50-60 км) L60 | ✓ | | | |
| 26 | LLNL, США | E3SM 1.1-ECA, 2019 | EAM (v1.0, неравномер. сетка 1° в среднем) L72, 360×180 | MPAS-Ocean (v6.0, oEC60to30 неравномерная SVTs сетка, разрешение 50-60 км) L60 | ✓ | | | |
| 27 | CAS, Китай | FGOALS-f3-L, 2017 | FAMIL2.2, C96; (1°×1°) L32, 360×180 | LICOM3.0 (триполярная сетка 1°×1°) L30, 360×218 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 28 | CAS, Китай | FGOALS-g3, 2017 | GAMIL2 (2°×2°) L32, 180×90 | LICOM3.0 (триполярная сетка 1°×1°) L30, 360×218 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 29 | FIO-QLNM, Китай | FIO-ESM 2.0, 2018 | CAM4 (0.9°×1.25° ) L26, 192×288 | POP2-W (POP2 + MASNUM) L60, 320×384 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 30 | GFDL, США | GFDL-CM4, 2018 | GFDL-AM4.0.1 C96 (1°×1°) L33, 288×180 | GFDL-OM4p5 (GFDL-MOM6, (номинально 0.25°)) L75, 1440×1080 | ✓ | | ✓ | ✓ |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 31 | GFDL, США | GFDL-ESM4, 2018 | GFDL-AM4.1 C96 (1°×1°) L49, 360×180 | GFDL-OM4p5 (GFDL-MOM6 (номинально 0.5°)) L75, 720×576 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 32 | NASA, США | GISS-E2-1-G, 2016 | GISS-E2.1 (2.5°×2°) L40, 144×90 | GISS Ocean (1.25°×1°) L32, 288×180 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 33 | NASA, США | GISS-E2-1-G-CC, 2016 | GISS-E2.1 (2.5°×2°) L40, 144×90 | GISS Ocean (1.25°×1°) L32, 288×180 | ✓ | | | |
| 34 | NASA, США | GISS-E2-1-H, 2016 | GISS-E2.1 (2.5°×2°) L40, 144×90 | HYCOM(1°×0.2~1.0°) L26, 360×180 | ✓ | | | |
| 35 | NIMR/KMA, Корея | HadGEM3-GC31-LL, 2016 | MetUM-HadGEM3-GA7.1 N96 (1.875°×1.5) L85, 192×44 | NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA1(1°×0.3~1°)) L75, 360×330 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 36 | МОНС, СК | HadGEM3-GC31-MM, 2016 | MetUM-HadGEM3-GA7.1 N216 (~0.6°×~0.8) L85, 432×324 | NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA025 триполярная сетка ~ 0.25°) L75, 1440×1205 | ✓ | ✓ | | ✓ |
| 37 | INM, Россия | INM-CM4-8, 2016 | INM-AM4-8 (2°×1.5°) L21, 180×120 | INM-OM5 (~1°×~1°) L 40, 360×318 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 38 | INM, Россия | INM-CM5-0, 2016 | INM-CM5-0 (2°×1.5°) L73, 180×120 | INM-OM5 (0.5°×0.25°) L40, 720×720 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 39 | IPSL, Франция | IPSL-CM6A-LR, 2017 | LMDZ4 (NPv6, N96 1.9°×3.75°) L79, 144×143 | NEMO-OPA (eORCA1.3, 1°~1.0° ) L75, 362×332 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 40 | NIMS-KMA, Корея | KACE1.0-G, 2018 | MetUM-HadGEM3-GA7.1 N96 L85, 192×144 | MOM4p1 (триполярная сетка ~1°) L50, 360×200 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 41 | UA, США | MCM-UA-1-0, 1991 | R30L14 (3.75°×2.5°) L14, 96×80 | MOM1.0 (MOM1, 1.875°× 2.5°) L18, 192×80 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 42 | JAMSTEC/AORI/R-CCS, Япония | MIROC6, 2017 | CCSR AGCM T85 (1.4°×1.4°) L81, 256×128 | COCO4.9 (t 1°×1°) L63, 256×360 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 43 | JAMSTEC/AORI/R-CCS, Япония | MIROC-ES2L, 2018 | CCSR AGCM T42 (2.8°×2.8°) L40, 128×64 | COCO4.9 (триполярная сетка ~1°×~1°) L63, 256×360 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 44 | HAMMOZ-Consortium | MPI-ESM1.2-HAM, 2017 | ECHAM6.3 T63 (1.9°×1.9°) L47, 192×96 | MPIOM1.63 (биполярная сетка ~1.5°) L40, 256×220 | ✓ | | | |
| 45 | DKRZ, Германия | MPI-ESM1.2-HAM, 2017 | ECHAM6.3 T127 (0.9°×0.9°) L95, 384×192 | MPIOM1.63 (триполярная сетка TP04, ~ 0.4° ×~0.4°) L40, 802×404 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 46 | DKRZ, Германия | MPI-ESM1.2-LR, 2017 | ECHAM6.3 T63 (1.9°×1.9°) L47, 192×96 | MPIOM1.63 (биполярная сетка ~1.5°) L40, 256×220 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 47 | MRI, Япония | MRI-ESM2-0, 2017 | MRI-AGCM3.5 TL159 (1.1°×1.1°) L80, 320×160 | MRI.COM4.4 (триполярная сетка ~1°×~0.5°) L61, 360×364 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 48 | NUIST, Китай | NESM3 v3, 2016 | ECHAM v3.6 T63 (1.9°× 1.9°) L47, 192×96 | NEMO v3.4(~1°×0.3° ~1.0°) L46, 362×384 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 49 | NCC, Норвегия | NorCPM1, 2019 | CAM-OSLO4.1 (2.5°×1.9°) L26, 144×96 | MICOM1.1 (~0.9°×1~0.5°) L53, 384×320 | ✓ | | | |
| 50 | NCC, Норвегия | NorESM2-LM, 2017 | CAM-OSLO (2.5°×1.9°) L32, 144×96 | MICOM (~0.9°×1~0.5°) L70, 384×360 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 51 | NCC, Норвегия | NorESM2-MM, 2017 | CAM-OSLO (1°×1°) L32, 288×192 | MICOM (~0.9°×1~0.5°) L70, 384×360 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 52 | SNU, Корея | SAM0-UNICON, 2017 | CAM5.3 UNICON (0.9°×1.25°) L30, 288×192 | POP2 (~0.9°×1~0.5°) L60, 320×384 | ✓ | | | |
| 53 | RCEC, Тайвань | TaiESM 1.0, 2018 | TaiAM1 (0.9°×1.25°) L30, 288×192 | POP2 (~0.9°×1~0.5°) L60, 320×384 | ✓ | | | |
| 54 | МОНС, СК | UKESM1-0-LL, 2018 | MetUM-HadGEM3GA7.1 N96 (8.75°×1.25°) L85, 192×144 | NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA1deg (~1°×1~0.3°)) L75, 360×330 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

# 2.

# ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ, НАСЕЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# 2.1 Природные системы

## 2.1.1 Природные системы суши

***О. Н. Липка, А. М. Алейникова, М. Д. Ананичева, А. П. Андреева, О. А. Анисимов, Д. Г. Замолодчиков, А. Н. Золотокрылин, Г. Э. Инсаров, А. С. Калугин, Г. Н. Огуреева, А. А. Сирин, А. В. Чернокульский, Б. Г. Шерстюков***

### 2.1.1.1 Разнообразие природных экосистем и их распределение

Анализ воздействия изменений климата и их последствий на природные системы требует принятия некой единой классификации и базового уровня, относительно которого будут оцениваться последующие изменения. Наиболее применима для использования концепция биомной (экосистемной) организации биосферы, в которую интегрированы данные о климатических условиях для соответствующих биомов и количественная оценка биологического разнообразия по основным систематическим группам растений и животных (Биоразнообразие биомов России, 2020).

Разнообразие природных условий способствовало формированию на территории России шести зонобиомов (биомов равнин), включающих 35 биомов. Обширные горные территории объединяются в пять оробиомов I порядка, в которых выделяется 31 биом (Биомы России, 2018; рис. 2.1.1.1).

***Рис. 2.1.1.1*** *Карта «Биомы России» (2018)*

*Зонобиомы: тундровые – 1-8, бореальные (таежные) – 9-22, гемибореальные – 23-26, неморальные (широколиственно-лесные) – 27-31, степные – 32-34, пустынные – 35.*

*Оробиомы: тундровые – 36-40, бореальные – 41-56, неморальные – 57-65, степные – 66*

Из интразональных экосистем на территории России наибольшую площадь (8,1%) занимают болота (Болота, 2017), которые в целом составляют более трети площади болот мира (Global, 2020) и представлены в каждом из биомов.

На территории России расположены разнообразные и самые обширные в мире водные объекты. В государственный водный реестр Российской Федерации включено 142,3 тыс. рек (водотоков), зарегистрировано 20,7 тыс. озер, находятся в эксплуатации 2650 водохранилищ с индивидуальной емкостью свыше 1 млн м$^3$, протяженность морских побережий составляет более 60 тыс. км (Белов и др., 2012).

### 2.1.1.2 Границы природных зон на равнине и в горах

По сравнению со Вторым оценочным докладом Росгидромета (Росгидромет, 2014) в литературе появляется все больше подтверждений климатообусловленных изменений. Как отклики экосистем на изменения климата, так и сведения о них неравномерно освещают территорию России, что связано не только с региональными особенностями изменений климата, но также с наличием сопоставимой информации за достаточно длительный промежуток времени.

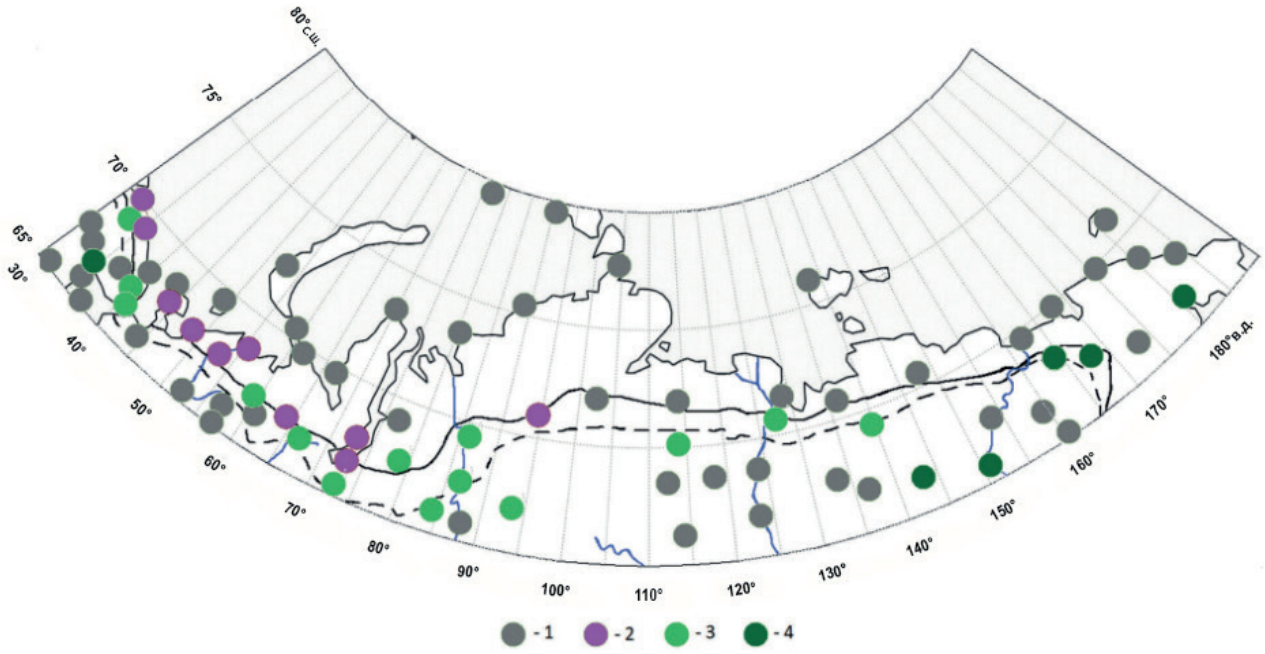



***Рис. 2.1.1.2*** *Возможные изменения в ландшафтных зонах севера России:*

*1 – климатические условия соответствуют ландшафтной зоне; 2 – переход ландшафтов тундры в лесотундровую зону; 3 – переход ландшафтов лесотундры в зону северной тайги; 4 – переход ландшафтов северной тайги в зону средней тайги.*

*Сплошная линия – граница тундры и лесотундры, пунктирная – граница лесотундры и северной тайги (Титкова, Виноградова, 2019)*

Наибольшее количество опубликованной информации относится к тундровым биомам. На некоторых участках тундры, лесотундры и северной тайги ЕТР и Западной Сибири климатические условия уже в настоящее время соответствуют более южным ландшафтным зонам (Титкова, Виноградова, 2019; рис. 2.1.1.2).

Общий тренд продвижения границы предтундровых редколесий на север составил за последние 30 лет от 10 км до 30 км (Белоновская и др., 2016). Продвижение границы леса на север ЕТР идет медленнее – со скоростью до 100 м/год за последние 50 лет, отмечаются также участки практически без изменений. На АТР скорость продвижения гораздо ниже – до 10 м/год, на востоке местами отмечается отступание границы (Rees et al., 2020).

В оробиомах отмечено продвижение древесной растительности в виде редколесий и кустарников в пояс горных тундр Хибин (Mathisen et al., 2014), Урала (Шиятов, Мазепа, 2015; Моисеев и др., 2018; Zolotareva, Zolotarev, 2017; Sannikov et al., 2018; Fomin et al., 2020; Gaisin et al., 2020), плато Путорана (Kirdyanov et al., 2012; Pospelova et al., 2017; Grigor'ev et al., 2019) и других приполярных возвышенностей, а также в зону тундры Западной Сибири (Сергиенко, 2015) и на Алтае (Kharuk et al., 2017; Gatti et al., 2019).

Верхняя граница распространения лиственничных редколесий и сомкнутых древостоев за последние 80-90 лет переместилась к северу в среднем на 35-40 м (а в максимуме – на 50-80 м) (Сергиенко, 2015).

В бореальных биомах изменение климата и участившиеся пожары смещают экотон южной тайги к северу (Brazhnik et al., 2017), в неморальных – восточная граница распространения широколиственных пород деревьев постепенно смещается на восток (Fedorov et al., 2021).

В лесостепных биомах древостои на южной границе ареала лиственницы сибирской страдают от засухи, что приводит к снижению роста и увеличению смертности деревьев (Dulamsuren et al., 2013). Пожары дополняют воздействие изменения температуры и дефицита влажности в Южной Сибири и тем самым ускоряют отступание лесов (Barrett et al., 2020).

В степных и пустынных биомах в последние десятилетия происходили разнонаправленные изменения их границ. В сухостепных биомах ЕТР в начале XXI века значения индекса аридности превысили средние многолетние примерно на 15%, а широтное смещение изолиний индекса к югу составило около 1° к 2012 г. (Золотокрылин и др., 2020), что подтверждалось данными спутниковых наблюдений об увеличении продуктивности. В других публикациях приводятся сведения об увеличении повторяемости опасной атмосферной засухи в вегетационный сезон в период 1995-2014 гг., сдвиге дат их начала на более ранние сроки (в среднем на 1-2 недели) на большей части территории (Черенкова, 2017). Прогнозы изменения климата также указывают на повышение вероятности сильных засух на юге ЕТР в середине века (Богданович и др., 2021), что воспрепятствует распространению степной растительности в будущем.

По сравнению с Каталогом ледников СССР (1965-1982 гг.) площадь ледников на территории России уменьшилась на 5594 км$^2$, или на 9,3% (Хромова и др., 2021). Процесс сокращения площадей идет неравномерно, подтверждается для территории Арктики (Ananicheva et al., 2020), Кавказа (Алейников, Липка, 2016), Алтая (Торопов и др., 2020) и гор Южной Сибири (Ananicheva, Karpachevsky, 2015). Ледники Чукотки и Колымы уже находятся ниже снеговой линии; гляциальная зона в Чукотском нагорье фактически отсутствует, в Колымском – на грани исчезновения (Ananicheva et al., 2020). Многие ледники плато Путорана (Среднесибирское плоскогорье) превратились в присклоновые ледники и каменные глетчеры (Тимирева и др.,

2016). Ледники Хибин и Приполярного Урала или перестали существовать, или находятся на завершающей стадии деградации, что свидетельствует об исчезновении нивального пояса в этих горных системах (Влияние изменений… 2013; Кренке и др., 2012). Для ледников Кавказа, Полярного Урала, Южной Сибири отмечается не только сокращение их площади, но и существенное ускорение деградации (в 1,5 и более раз) по сравнению с периодом 1968-2008 гг. (Котляков и др., 2015).

Отмечается, что изменения режима осадков и глубины протаивания многолетнемерзлых грунтов, повторяемости засух, лесных и тундровых пожаров, распространения и всхожести семян, внутри- и межвидовых взаимодействий деревьев и кустарников, вспышек массового размножения насекомых, а также антропогенные воздействия (освоение и эксплуатация месторождений полезных ископаемых, выпас и др.) могут в конкретной точке оказать более заметное влияние на изменение положения границ экосистем по сравнению с повышением температур (Schaphoff et al., 2016; Körner, 2020).

По данным модельных прогнозов подтверждаются выводы, сделанные во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014): к середине XXI века климатические условия уже не будут соответствовать господствующему типу растительности для большинства биомов (Жильцова, Анисимов, 2015; табл. 2.1.1.1). Соответственно, гипоарктические тундровые и частично арктические тундровые биомы будут становиться пригодными для развития лесной растительности (рис. 2.1.1.3; Anisimov et al., 2017).

***Таблица 2.1.1.1***

*Доля территории (%) различных регионов России, на которой прогнозируется смена биомов в первой четверти и в середине XXI века (Жильцова, Анисимов, 2015)*

| Период | ЕТР | Западная Сибирь | Восточная Сибирь | Дальний Восток | Россия |
|---|---|---|---|---|---|
| 2016–2045 гг. | 58 | 64 | 55 | 48 | 56 |
| 2031–2060 гг. | 71 | 74 | 70 | 57 | 67 |

Прогнозируется, что в XXI веке в более теплом и сухом климате сибирские леса сдвинутся на северо-восток, а на юге увеличатся по площади лесостепи и степи. Таяние верхнего слоя мерзлоты и расширение активного слоя почвы приведут к продвижению темнохвойной тайги из кедра, пихты и ели на север, однако таяние не будет быстрым, и бореальные леса из лиственницы даурской будут по-прежнему преобладать (Parfenova et al., 2019). Эти выводы отчасти согласуются с прогнозами для всей территории России до конца XXI века (рис. 2.1.1.4). Для всех рассмотренных сценариев характерно существенное уменьшение площади хвойных вечнозеленых бореальных лесов и менее значимое уменьшение площади бореальных мелколиственных и лиственничных лесов, которые будут в значительной степени заменяться широколиственными листопадными лесами, а также травянистыми типами растительности. При этом методика моделирования, вероятно, приводит к существенному завышению скорости динамики экосистем (Барталев и др., 2016).

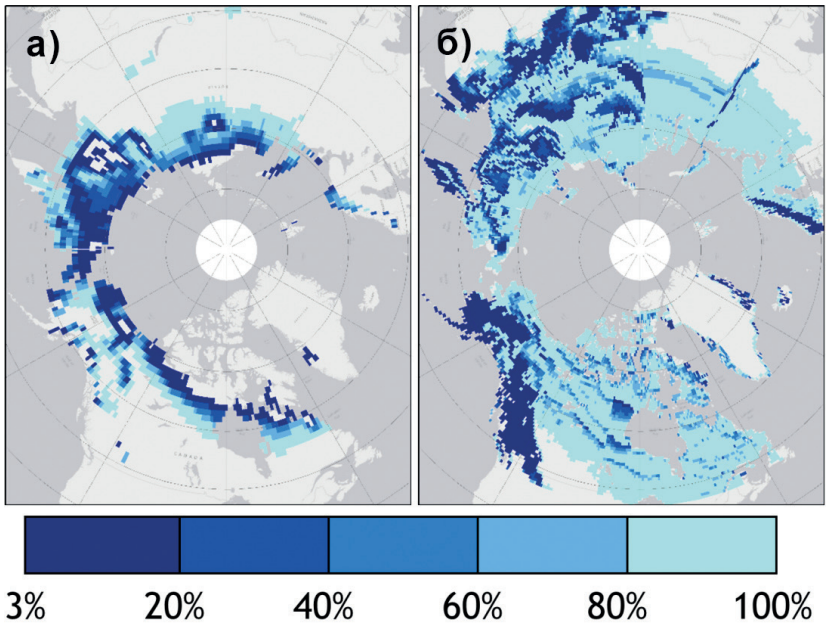



***Рис. 2.1.1.3*** *Вероятностный прогноз продвижения границы леса (а) и смены современных биомов (б) по климатическим показателям в середине XXI века (Anisimov et al., 2017)*

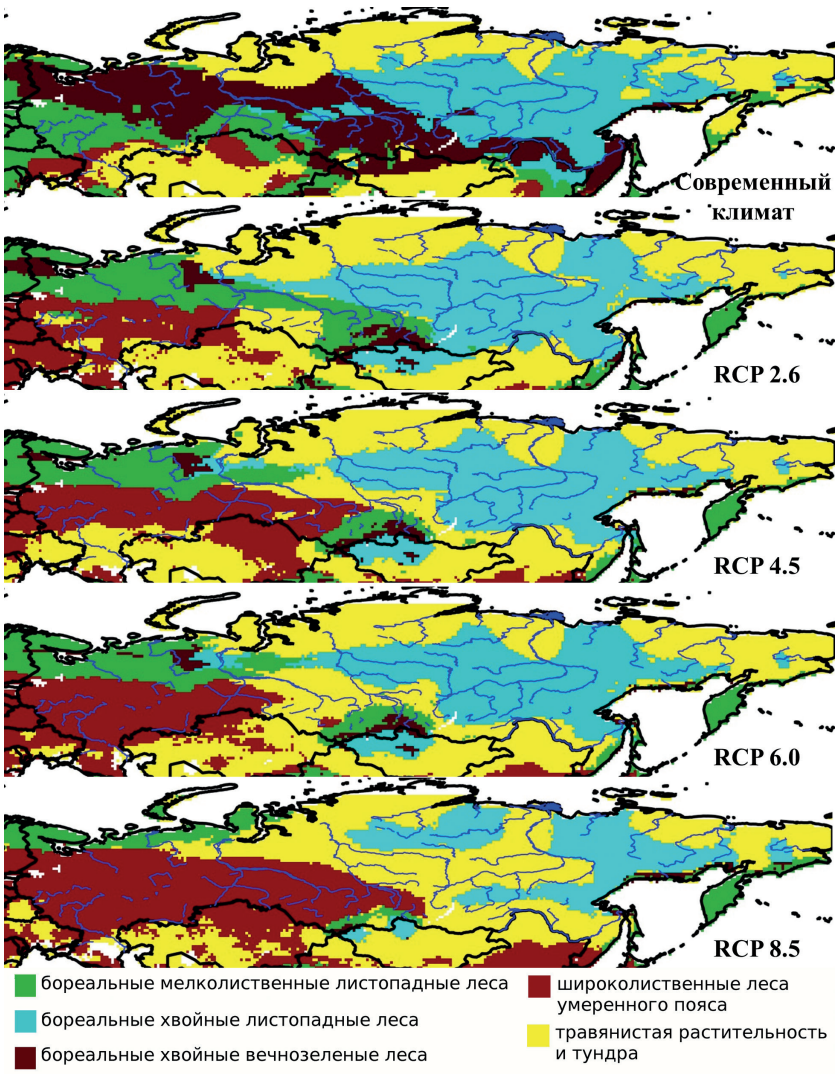



***Рис. 2.1.1.4*** *Преобладающий на 2100 г. тип растительного покрова для различных сценариев изменений климата*

### 2.1.1.3 Изменение видового разнообразия и ареалов растений и животных

По сравнению со Вторым оценочным докладом Росгидромета (Росгидромет, 2014) появились новые свидетельства изменения ареалов отдельных видов растений и животных. Однако полученные данные по-прежнему обрывочны: относятся к отдельным территориям России и отдельным систематическим группам видов.

Большинство видов реагирует на изменение климата с задержкой, которая может достигать десятков и сотен лет (Schickhoff et al., 2015; Тишков и др., 2021). К наиболее биотически значимым проявлениям изменения климата относят рост среднегодовой температуры, увеличение продолжительности вегетационного периода, рост количества осадков и увеличение мощности снежного покрова (Тишков и др., 2019а).

Ряд авторов подчеркивает, что климатический фактор не всегда является единственным и далеко не всегда – определяющим. На значительной части территории России рост деревьев и смещение границ биомов зависит не только от глобального потепления, но и от ряда других связанных между собой естественных и антропогенных факторов. Результаты взаимодействия прямых и обратных связей могут быть непредсказуемыми, поскольку механизмы, лежащие в основе этих процессов, недостаточно изучены (Berner et al., 2013; Brazhnik, Shugart, 2015). Так, увеличение за последние 100 лет разнообразия сосудистых растений Якутии связывают не только с распространением из Прибайкалья и Забайкалья их новых видов, но и с увеличением общей изученности территории (Десяткин, 2018). Результаты изучения некоторых видов птиц на ЕТР указывают как на сокращение, так и восстановление их ареалов вследствие изменения воздействия антропогенного фактора (Glushenkov, 2017).

Смещение ареалов на север, как правило, связывают с повышением среднегодовых или среднесезонных температур (Тишков и др., 2019а). Количество видов и численность отдельных популяций могут и уменьшаться, и увеличиваться, но в большинстве регионов отмечается внедрение более южных видов флоры и фауны. В гипоарктических тундровых и в ряде горных биомов наблюдается продвижение деревьев на север и вверх по склонам гор (Mathisen et al., 2014; Шиятов, Мазепа, 2015; Белоновская и др., 2016; Pospelova et al., 2017; Grigor'ev et al., 2019). Распространение на север многих видов грибов лимитировано отсутствием необходимого субстрата, а не климатическим фактором (Ширяев и др., 2019). Изменение климата на ЕТР влияет на расширение ареала в северном и северо-восточном направлениях таких видов птиц, как лебедь-шипун, серая утка, красноголовый нырок, орел-карлик, орел-могильник и лысуха (Glushenkov, 2017), а также белощекой казарки в АЗРФ, при увеличении численности в 5-10 раз за последние 20 лет (Тишков и др., 2018). За полвека орнитофауна Якутии увеличилась по сравнению с прежним составом почти на 20% (Десяткин, 2018).

В Тюменской области высокие темпы динамики фауны приходятся на последние 50 лет, а наибольшие – на последние 15 лет, что связано с тенденцией усиления континентальности регионального климата на фоне глобального потепления северного полушария (Гашев, Курхинен, 2015). Северная граница распространения благородного оленя продвинулась от устья реки Олекма до устья реки Алдан, охватывая полностью Лено-Алданское междуречье, а ареал косули достиг полярного круга (Десяткин,

2018). Ареалы таких типично таежных видов, как рысь и бурый медведь, сдвинулись в Арктику на 200-300 км (Тишков и др., 2018).

Одновременно отмечаются тренды сокращения численности и ареалов некоторых видов. В результате процесса «позеленения» тундровых биомов, продвижения таежных видов растений и животных происходит трансформация местообитания и критическое снижение запасов лишайниковых кормов на отдельных участках п-ова Таймыр, что сказывается на численности северного оленя (Pospelova et al., 2017; Тишков и др., 2018). Проникновение в зону тундр бореальных видов (бурого медведя и рыси) усиливает межвидовую конкуренцию, что приводит к снижению численности арктических видов (песца и белого медведя), а также сокращению их ареалов (Тишков и др., 2018). В Алтае-Саянском экорегионе уменьшаются площади горно-тундровых местообитаний и быстро сокращается численность популяций характерных видов (тундряная куропатка, краснобрюхая горихвостка и др.) (Баранов, Воронина, 2016). В пустынных биомах Калмыкии в результате аридизации за последние 10-15 лет произошло сокращение ареалов и численности уязвимых видов птиц: степного орла, степного луня, дрофы и др. (Шаповалова, 2017).

Прогноз изменения ареалов видов, как правило, основан на результатах моделирования. При этом результаты, полученные по одним и тем же данным, но с помощью разных моделей, могут значительно различаться (Shuman et al., 2015). Горизонты прогнозирования варьируют, но в большинстве случаев находятся в пределах текущего столетия. Значительная часть биоклиматических моделей из всех лимитирующих факторов учитывает только климатические (Семенов и др., 2020), поэтому прогнозы изменения ареалов видов могут не оправдаться (Тишков и др., 2020).

Для высокоарктических и тундровых биомов прогнозируется «бореализация» флоры – внедрение более южных видов, связанное с повышением температуры воздуха. Увеличение количества осадков способствует повышению доли более влаголюбивых видов, в том числе злаков и осок, а увеличение высоты снежного покрова – росту разнообразия кустарничков и снеголюбивых видов мхов и цветковых растений (Тишков и др., 2019а). Прогнозируется: рост разнообразия за счет миграций видов более южных широт, изменение путей миграции, расширение ареала, нарушение репродуктивного цикла арктических видов, успешное размножение гипоарктических и бореальных видов (Тишков и др., 2019б).

Такие типично таежные виды, как дикий кабан, лось, косуля, продвинутся на север за пределы современного ареала, а северный олень и песец сократят свою численность (Гашев и др., 2017). Хотя области преобладания хвойных лесов к концу XXI века могут сократиться в десятки раз, ареалы видов-лесообразователей уменьшатся не более, чем в два раза (Бартелев и др., 2016). В горных лесных и лесостепных биомах Зауралья и в лесостепи Западной Сибири ожидается дальнейшее обогащение местных орнитофаун за счет более южных видов (Гордиенко, 2017).

Потепление поверхностных вод приводит к смещению сроков появления и доступности кормовой базы морских и озерных видов, а также к сокращению ледяного покрова, изменению режимов стратификации и перемешивания вод (Hampton et al., 2018; Woolway et al., 2020). В результате популяции холодолюбивых

эндемичных видов, например, для оз. Байкал, могут быть вытеснены теплолюбивыми широко распространенными видами (Brown et al., 2021).

#### 2.1.1.4 Изменение фенологических дат

После издания Второго оценочного доклада Росгидромета (Росгидромет, 2014) вышло довольно много публикаций, посвященных изменениям в фенологии отдельных видов и систематических групп, в которых географический охват стал более репрезентативным. В наиболее масштабном исследовании более 100 авторов проанализировали данные 70 709 наблюдений за 60 лет систематического мониторинга на территории бывшего СССР (Delgado et al., 2020; Roslin et al., 2021). Для 110 фенологических явлений зависимости оказались гораздо более сложными, чем предполагавшийся сдвиг дат на более ранние сроки весной, более поздние осенью и более сильный отклик в высоких широтах и в горах. Например, весенние события действительно происходят раньше, а осенние события – позже (удлиняется вегетационный период растений или период активности животных), а отклик заметнее в более теплых районах (т.е. более южных широтах) и в горах. В качестве примеров приводится первое цветение многих растений (от мать-и-мачехи до ландыша), первый полет шмелей, первое появление ряда видов птиц (от стрижа до журавля). Среди событий, смещающихся на более позднюю дату, необходимо указать на пожелтение и опадение листьев на деревьях (от осины до березы) (Roslin et al., 2021). Как правило, у продуцентов (растений) наблюдался более сильный отклик на изменение климата, чем на более высоких уровнях питательных цепей. Таким образом происходит рассинхронизация фактических климатических изменений на общем фоне смещения весенних и осенних дат на более ранние и более поздние сроки (Roslin et al., 2021). Сдвиг весенних фенологических дат происходит более активно, чем осенних (Delgado et al., 2020).

Метеорологические параметры весны и начала лета (теплообеспеченность и осадки) определяют гнездопригодность и состояние кормовых ресурсов местообитаний, а фенологические сроки весеннего развития природы влияют на формирование местного населения птиц за счет изменения числа обосновавшихся в районе гнездования особей (Ананин, 2018). Хотя у большинства видов птиц на ЕТР и в Центральной Сибири наблюдается сдвиг сроков весеннего прибытия птиц на более ранние (Glushenkov, 2017; Бобрецов и др., 2017; Бурский, 2020), в тех же районах отмечаются виды с более поздними сроками прилета (Glushenkov, 2017; Бобрецов и др., 2017). В бореальных биомах Западной Сибири осенние фенологические явления в фаунистическом комплексе проявляют себя как более чувствительные по сравнению с весенними (Гашев и др., 2017). В Центральной Сибири отмечается более раннее начало гнездования, причем у ближних мигрантов сдвиг срока существеннее (до 12 дней), чем у дальних (Бурский, 2020).

На изменение климата реагируют и беспозвоночные: в новых условиях увеличивается благоприятный для их развития период и возрастает скорость развития всех или отдельных стадий у насекомых, что создает возможности для увеличения количества поколений в течение сезона. Экологическое значение процесса оценить пока сложно, поскольку при этом нарушается сбалансированная структура биоценоза, что, в свою очередь, чревато непредсказуемыми и чаще негативными последствиями (Мусолин, Саулич, 2012).

Накопление малозаметных разнонаправленных отклонений в сезонной динамике биоты может послужить основанием для скачкообразного перехода ее на новый уровень при сохранении современных тенденций изменений климата (Гордиенко, 2017).

### 2.1.1.5 Углеродный бюджет и продуктивность экосистем

Запасы органического углерода для зонобиомов зависят не только от свойств растительности и почв, но и от занимаемой ими площади (табл. 2.1.1.2). Максимальные запасы содержатся в бореальных биомах, из которых суммарные запасы среднетаежных биомов более чем в два раза превышают любые другие. Во всех биомах запасы углерода в почвах в 2-23 раза превышают их запасы в растительности. В южных бореальных и неморальных биомах вклад растительности в запасы максимален (Иванов, Столбовой, 2019).

***Таблица 2.1.1.2***

*Запасы углерода в почвах и биомассе растительности природных зон России до освоения территории (Иванов, Столбовой, 2019)*

| Природная зона | Площадь, млн га | Запасы, Гт С | | | Отношение запасов в почвах к запасам в растительности |
|---|---|---|---|---|---|
| | | в слое почвы 1м | в растительности | всего | |
| Полярные пустыни | 0,7 | 0,1 | 1,0 | 1,1 | – |
| Тундры | 266,9 | 44,2 | 2,0 | 46,2 | 22 |
| Лесотундра и северная тайга | 233,0 | 62,6 | 5,3 | 67,9 | 12 |
| Средняя тайга | 683,6 | 111,3 | 29,1 | 140,4 | 4 |
| Южная тайга | 211,5 | 40,9 | 10,7 | 51,6 | 4 |
| Умеренные леса | 60,4 | 8,7 | 3,8 | 12,5 | 2 |
| Степи | 148,8 | 27,3 | 1,2 | 28,5 | 23 |
| Полупустыни и пустыни | 25,4 | 2,4 | 0,2 | 2,6 | 12 |
| Итого | 1629,8 | 297,4 | 51,3 | 348,7 | 6 |

В глобальном исследовании изменения запасов углерода почвы (Prăvălie et al., 2021) показано, что на территории России в слое почвы 0-30 см отмечаются чистые потери углерода порядка 30,5 т С км$^2$/год. По величине чистых потерь Россия вместе с некоторыми другими странами (например, Канадой, Швецией, Финляндией) отнесена к «горячим точкам» сокра-

щения запасов. Потери углерода почвенным покровом бореальных лесов происходят под воздействием лесозаготовок и лесных пожаров. Прямые эмиссии углерода за счет пожаров в 2002-2018 гг. оценивались в пределах от 12 (2009 г.) до 127 (2003 г.) млн т С/год и в среднем составили 34±19 Мт С/год (Ершов, Сочилова, 2020). При этом площадь повреждений лесов и интенсивность прямых пирогенных выбросов углерода после 2012 г. увеличились в 1,4 раза (Гераськина и др., 2021).

Одновременно в работе (Mukhortova et al., 2021) утверждается, что роль нарушений в увеличении гетеротрофной части дыхания почв России составляет около 2%, в то время как изменения климата могут в зависимости от выбранного сценария увеличить к 2100 г. современный уровень дыхания почвы (3,2 Гт С/год) на 13% (до 3,6 Гт С/год) и 34% (до 4,3 Гт С/год) (Mukhortova et al., 2021).

Сток углерода в природные экосистемы суши на территории России остается объектом пристального внимания отечественных и зарубежных исследователей. Оценки отечественных специалистов в основном относятся к лесной территории, что определяется, с одной стороны, преобладанием этого типа растительного покрова на территории России, с другой – прямой возможностью использования поглощения углерода лесами для выполнения обязательств по международным климатическим соглашениям. Согласно оценкам, полученным на основе системы РОБУЛ, сток углерода в леса России в 2015 г. составлял 206,1 ± 58,9 млн т С/год, причем отмечается уменьшение стока на 33 млн т С/год по сравнению с его максимальной величиной в 2008 г. (Замолодчиков и др., 2017). Сокращение стока углерода было обусловлено увеличением потерь: при рубках – на 44%, последствиями лесных пожаров – на 21%, снижением поглощения – на 34%. В ряде публикаций отмечается, что сток углерода в леса России в 2009-2016 гг. составлял 480-540 млн т С/год и устойчиво увеличивался (Филипчук и др., 2017, 2020).

Указанные расхождения имеют методологическую природу. Так, в Национальный кадастр включаются данные только по антропогенным потокам без учета естественного поглощения неуправляемых экосистем (Романовская и др., 2018). Предпринимаются усилия по применению новых источников информации для оценки углеродного баланса лесов России, в том числе данных Государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), первый цикл которой проходил на территории России в 2007-2020 гг. В работе (Shchepashchenko et al., 2021) сток углерода в биомассу лесов России оценивается в 354 млн т С/год для периода 1988-2014 гг. Указанная величина получена расчетом по разности запасов между 2014 г. (данные ГИЛ) и 1988 г. (данные государственного учета лесного фонда), что, как отмечают сами авторы, может стать серьезным источником системной ошибки. Анализ, интегрирующий данные дистанционного зондирования (например, данные по нарушениям согласно Global Forest Watch) для лесов России, дает оценку чистого стока углерода около 500 млн т С/год (Harris et al., 2021).

Оценка на основе ансамбля глобальных моделей динамики растительности для территории России дала величину стока 199 млн т С/год (Sitch et al., 2015). Метод инверсионного моделирования, связанный с расчетом потоков $CO_2$ по измеряемым концентрациям этого газа в атмосфере, можно считать способом прямого определения углеродного баланса территории. Расчеты, проведенные по данным космических

спутников (Wang et al., 2019), для региона «Бореальная Евразия» дали значения стока углерода в экосистемы суши в диапазоне от 156 до 224 млн т С/год.

Таким образом, современные оценки стока углерода как для площади лесов, так и всех наземных экосистем России колеблются в пределах от 200 до 500 млн т С/год, что совпадает с опубликованными ранее результатами (Росгидромет, 2014; Кудеяров, 2018).

Исследование влияния изменений климата на углеродные параметры территории Сибири (Arneth et al., 2016) показало увеличение общих запасов углерода с 305±1,1 Гт С (1981-2000 гг.) до 320±1,1 Гт С (2031-2050 гг.) и 340±1,1 Гт С (2081-2100 гг.), что соответствует среднегодовому стоку углерода 350 млн т С/год. При этом подавляющая часть увеличения запаса углерода относится к фитомассе растительного покрова (с 45±1,1 до 77±2,8 Гт С).

При оценке углеродного баланса степей России был использован набор экспериментально-полевых оценок локального уровня с последующим распространением на площадь степных биомов (34-50 млн га). С учетом сформированных на месте залежей вторичных степных экосистем величина общего стока $CO_2$ была оценена в 92-121 млн т С/год (Курганова и др., 2019).

Для оценки изменения продуктивности экосистем активно используются данные дистанционного зондирования, в частности – нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), который на основе спутниковых снимков позволяет оценить количество и распределение фотосинтетически активной биомассы. По сравнению со Вторым оценочным докладом Росгидромета (Росгидромет, 2014) появляются новые подтверждения так называемого «позеленения» тундры – увеличения высоты кустарников и покрытой ими площади (Myers-Smith et al., 2015; Титкова, Виноградова, 2019), а также «олуговения» тундр (Тишков и др., 2019б). Процесс обусловлен повышением интенсивности фотосинтеза, увеличением надземных запасов и продукции фитомассы в условиях роста продолжительности вегетационного периода, улучшения теплового режима почв и большей доступности питательных веществ для растений (Тишков и др., 2018). Подтверждена положительная связь между увеличением глубины протаивания многолетнемерзлых грунтов и «позеленением» тундры (Peng et al., 2020). Прослеживается слабая связь увеличения продуктивности с осадками, поскольку на подавляющей части арктической территории они не являются лимитирующим фактором (Анисимов и др., 2015). С другой стороны, как избыточное, так и недостаточное увлажнение является сдерживающим фактором для роста деревьев в биотопах, вопреки благоприятному повышению температуры (Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva et al., 2020).

Наряду с «позеленением», в некоторых регионах Северной Евразии отмечается так называемое «побурение» (browning) – снижение фотосинтетической активности (IPCC, 2019). Оно связано с расширением площади арктических болот, антропогенными нарушениями и трансформацией ландшафтов в результате деградации многолетнемерзлых пород (Тишков и др., 2019а, б), «Побурение» распространяется на площади около 300 тыс. км$^2$, что сопоставимо с площадями «позеленения» (Тишков и др., 2019б).

Максимальные изменения индекса NDVI отмечаются на Кольском п-ове, в западной части Большеземельской тундры, Западной и Вос-

точной Сибири. Использование спутниковой информации подтверждает выводы, полученные на основании климатических данных, о возможности перехода некоторых северных территорий в другую ландшафтную зону и создании предпосылок для смещения к северу границ переходных ландшафтов (Титкова, Виноградова, 2019).

Прогнозируется, что многие из выявленных закономерностей сохранятся и в будущем, но возможно перераспределение темпов роста продуктивности между биомами. Так, в Дальневосточном секторе по-прежнему ожидаются наибольшие темпы роста продуктивности, однако, в отличие от современной ситуации, они будут достигаться прежде всего за счет тундры и лесотундры (включая оробиомы) (Анисимов и др., 2015). К 2025 г. ожидается продолжение роста продуктивности на Кольском полуострове, в Большеземельской тундре, на полуостровах Ямал и Гыдан, и снижение – на Полярном Урале, севере Западной Сибири, в Колымской низменности (Тишков и др., 2021).

Относительный вклад потепления и других факторов в тенденции роста растений изучен недостаточно (Schickhoff et al., 2015; Hansson et al., 2021). Прогноз прироста древесины по годичным кольцам является одним из индикаторов изменения продуктивности. На увеличение годичного прироста ели положительно влияет увеличение продолжительности вегетационного сезона (с мая по сентябрь до апреля – октября). В северных регионах этот эффект может иметь большее значение, т.к. на юге ЕТР увеличению прироста деревьев будут мешать засухи (Matskovsky et al., 2020a, б).

Для степных и пустынных биомов отмечается рост частоты засух в 1991-2018 гг. по сравнению с 1961-1990 гг. (Черенкова и др., 2021; Национальный доклад, 2021). При этом информация о снижении продуктивности приводится в основном для сельскохозяйственных культур, реже – для пастбищ. В отдельные годы отмечается полное уничтожение растительного покрова в результате кумулятивного воздействия засух, перевыпаса и нашествия саранчи (Шинкаренко и др., 2020).

### 2.1.1.6 Уязвимость видов и экосистем к изменениям климата

За рубежом около 10 лет назад уже были обобщены основные типы и факторы негативного или позитивного воздействия изменений климата на отдельные виды животных и растений (Mawdsley et al., 2009; Watson et al., 2012). Тем не менее в отечественной литературе комплексных оценок уязвимости для видов после Второго оценочного доклада Росгидромета (Росгидромет, 2014) опубликовано не было. Изменения климата рассматриваются в методике Международного союза охраны природы (МСОП, IUCN) в качестве одного из угрожающих процессов (IUCN, 2019). Для учета климатических параметров в оценке уязвимости видов (рис. 2.1.1.5) был выработан специальный пошаговый механизм.

Всемирный фонд дикой природы (WWF) разработал методику оценки уязвимости для животных (Advani, 2014a), которая была успешно апробирована в России для сайгака, тихоокеанского моржа, а также при оценке глобальных популяций белого медведя (Advani, 2016) и снежного барса (Advani, 2014б).

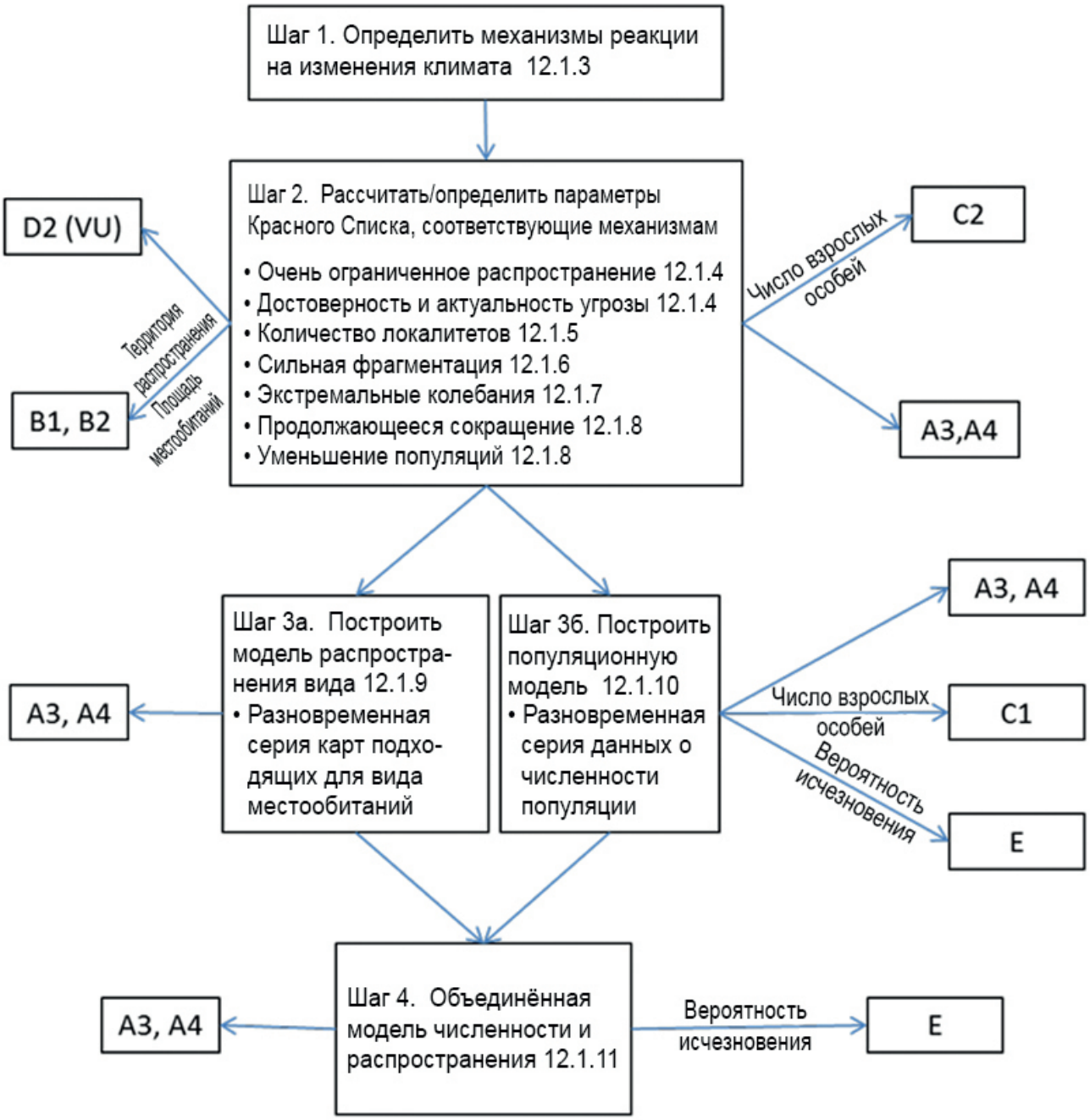



***Рис. 2.1.1.5*** *Схема оценки рисков исчезновения в условиях изменения климата с использованием критериев Красного списка МСОП для исчезающих видов*

*Буквы и цифры в полях относятся к соответствующим критериям Красного списка, а цифры в центральных ячейках – к соответствующим разделам текста (IUCN, 2019)*

В атласе «Морские млекопитающие» (2017) для ряда видов потепление климата определено как одна из угроз, но в большинстве случаев без пояснения механизма негативного воздействия и степени угрозы. Для белого медведя оценка уязвимости дана на основе исключительно зарубежных источников: потепление климата, если оно продолжится в текущем столетии, признано главной угрозой белому медведю (Stirling, Derocher, 2012) в связи с неблагоприятными изменением ледовой обстановки, ростом числа случаев аномальных оттепелей в течение зимы и выпадения дождей в начале весны и другими связанными с потеплением

факторами. В результате происходит ухудшение физиологического состояния животных, уменьшение числа выводков, снижение выживаемости и рождаемости (Derocher et al., 2004; Stirling, Parkinson, 2006). Согласно прогнозу (Wiig et al., 2015), существует вероятность того, что в течение жизни трех поколений численность вида может сократиться не менее чем на 30% (Морские млекопитающие, 2017).

Гораздо чаще в публикациях отмечается воздействие одного или небольшого числа климатообусловленных факторов на популяцию, отдельный вид или группу видов. Например, современные разнонаправленные тренды в распространении и динамике численности некоторых групп водоплавающих птиц Арктики связывают с «позеленением» тундры: для 34 видов водоплавающих птиц зафиксировано снижение общей послегнездовой численности (с 17,8 млн в конце XX века до 15,7 млн в 2016 г.).

Для арктической фауны прогнозируются разнонаправленные тренды: расширение/сокращение ареала, снижение численности арктических видов, рост отдельных видов-фитофагов; изменение путей миграций. В частности, для хищных млекопитающих ожидается снижение численности за счет усиления конкуренции с южными видами; для леммингов и других грызунов – изменение в ритмике размножения и исчезновение «циклов» в динамике численности; для дикого северного оленя возможен как рост численности, благодаря росту продуктивности летних пастбищ, так и массовая гибель из-за частых зимних оттепелей в местах зимовок и формирования ледяной корки на снегу; для гусеобразных птиц – расширение ареала и внутрисезонных миграций, рост разнообразия на арктических островах за счет гнездования новых видов (Тишков и др., 2019а).

В России не ведется учет животных, погибших в результате природных пожаров. По данным Greenpeace, в 2019 г. на территории, пройденной огнем в Красноярском крае, находилось около 13 000 особей охотничьих животных (кабарга, соболь, рысь, лось, медведь, дикий северный олень). Расчеты были выполнены на основе данных по численности животных из указов губернатора Красноярского края за 2018-2019 гг. и спутниковых данных ИСДМ Рослесхоз (Greenpeace, 2019).

Изменение климата называют в качестве одной из главных причин глобального кризиса опыления, т.е. сокращения численности и разнообразия опылителей. Наиболее часто рассматриваются последствия повышения температуры, расхождения фенологических дат у опылителей и растений и неблагоприятных погодно-климатических явлений (IPBES, 2016; Decourtye et al., 2019; Marshman et al., 2019; Крыленко, Ясюкевич, 2021).

Высокоарктические, арктические тундровые и гипоарктические тундровые биомы испытывают на себе наибольшее повышение средних годовых и сезонных температур на территории России (см. главу 1.2.1). На изначальную хрупкость низкопродуктивных экосистем с медленной скоростью восстановления накладываются неблагоприятные погодно-климатические явления, а также обширные планы по освоению территории (Тишков и др., 2019а; Эдельгериев, Романовская, 2020; Шестой Национальный, 2020). Антропогенная деятельность уже привела к деградации экосистем на площади около 300 тыс. км$^2$, что подтверждается данными дистанционного зондирования. «Позеленение» Арктики нельзя рассматривать как компенсационную меру, т.к. оно частично является результатом антропогенных нарушений, а климатообуслов-

ленные изменения свидетельствуют о дестабилизации и перестройке экосистем (Тишков и др., 2018; Тишков и др., 2019а) – см. врезку «Арктическая зона Российской Федерации» ниже.

Как отмечалось во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), уязвимость лесных экосистем бореальных, гемибореальных и неморальных биомов к изменениям климата связана как с биотическим, так и с абиотическим воздействием (Seidl et al., 2017). К первому типу относятся вспышки размножения насекомых-вредителей и болезней (Kautz et al., 2017; Kharuk et al., 2021a), ко второму – лесные пожары, продолжительные засухи и наводнения, экстремальные ветровые и снежно-ледовые режимы. Взаимодействие различных воздействий может давать синергетический эффект по формированию более разрушительных кумулятивных или каскадных воздействий (Millar, Stephenson, 2015; Buma, 2015). В частности, подобный эффект может достигаться в условиях долгоживущих блокирующих антициклонов, с которыми связано усиление засух и пожаров (Мохов и др., 2020), наиболее крупные ветровалы (Shikhov et al., 2020).

Для ЕТР (Senf et al., 2018, 2020) и АТР (Kharuk et al., 2021a, б) в последние десятилетия выявлен рост гибели лесных экосистем из-за ветровалов (Potapov et al., 2015). Преобладают шквалловые и смерчевые ветровалы теплого периода (Shikhov et al., 2020), которые наносят заметный ущерб лесному фонду (рис. 2.1.1.6). В отдельные годы площадь ветровых повреждений в лесах может достигать 30% от площади, пройденной пожарами (Shikhov et al., 2019). Значимая роль ветровалов в формировании лесных нарушений отмечена и на севере ЕТР по дендрохронологическим данным (Khakimulina et al., 2016). Повторяемость смерчей на юге Сибири и Дальнего Востока существенно ниже, чем на ЕТР (Chernokulsky et al., 2020). В целом уязвимость к ветровому воздействию тем выше, чем больше возраст и высота древостоя, а также доля хвойных пород (Mitchell, 2013), что подтверждается и для территории России (Shikhov et al., 2020; Chernokulsky et al., 2021).

Воздействие пожаров на лесные экосистемы по-прежнему наносит наибольший ущерб, что отмечалось ранее во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). По данным дистанционного зондирования наиболее высокая подверженность лесным пожарам характерна для регионов Дальнего Востока (Плотникова и др., 2019). Пожары в лесах России начинаются весной вместе со сходом снежного покрова и продолжаются до осенних дождей, несмотря на противопожарные мероприятия. Сравнение числа пожароопасных дней в году с фактическими данными о числе лесных пожаров по субъектам Федерации с учетом площадей, занятых лесом, подтвердило тесную связь лесных пожаров с метеорологическими условиями (Шерстюков, 2021).

При этом сохраняется неопределенность как в оценке площади природных пожаров на территории России (Барталев и др., 2015; Елисеев, Васильева, 2020), так и в оценке трендов, которые зависят от выбора методики, периода и региона. По данным официальной статистики, средняя площадь земель лесного фонда, пройденная огнем, составляет 3662 млн га в год (ЕМИСС, 2021; Гераськина и др., 2021), тогда как по данным спутникового мониторинга ежегодно огнем повреждаются леса на площади от 5 до 20 млн га (Лупян и др., 2017; Гераськина и др., 2021). Для Сибирского региона в период 1996-2019 гг. наблюдался рост числа и площади пожаров (Kharuk et al., 2021b), однако для всей России в период 2001-2019 гг. отмечена отрицательная тенденция (Мохов и др., 2020).

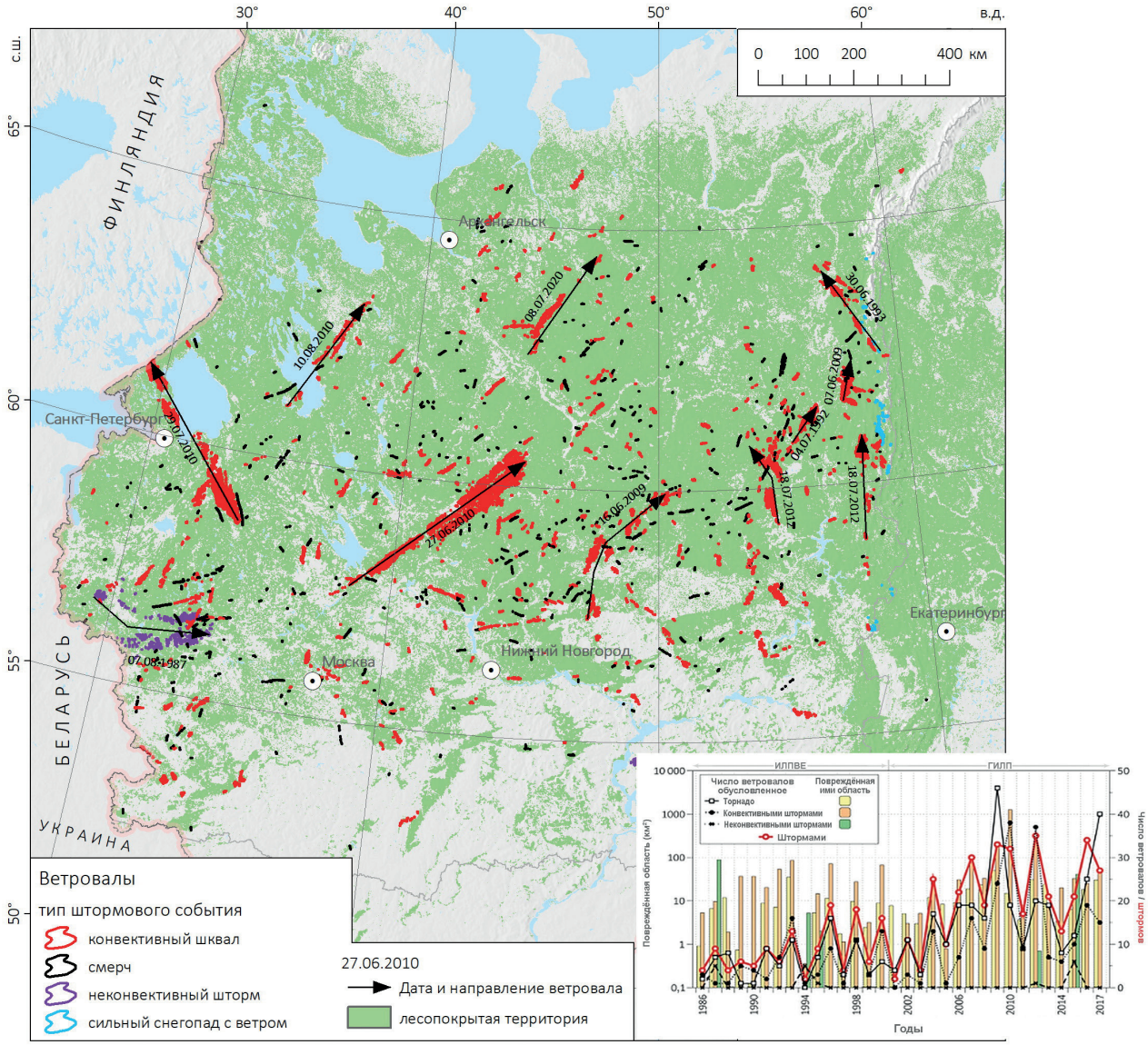



***Рис. 2.1.1.6*** *Карта шкваловых (красный), смерчевых (черный) и неконвективных (фиолетовый) ветровалов на ЕТР по спутниковым данным в 1986-2017 гг. (основная карта) и изменение площадей ветровалов и смерчевых событий (врезка) (Shikhov et al., 2020)*

По данным на конец октября 2019 г., площадь территорий, которые были пройдены пожарами в течение сезона, оценивалась в 10 млн га, что близко по масштабам к годам наиболее сильной горимости (2003, 2012, 2018 гг.). Впервые с 2000 г. два года сильной горимости следовали один за другим с почти равными площадями поражения. Ранее таких случаев не фиксировалось за все годы постоянного наблюдения за лесными пожарами в XX в. (Лупян и др., 2019).

В среднем по стране доля лесных пожаров в результате молниевого поджога оценивается в 10%, снижаясь в северных районах до 2%. Сравнительный анализ данных за 1958-2018 гг. показывает увеличение доли лесных пожаров, вызванных грозами, даже для Мурманской области (Князев, Исаева, 2019).

Межгодовая изменчивость площади лесов, подверженной природным биотическим и абиотическим воздействиям, в существен-

ной мере маскируется антропогенным влиянием: вырубками и облесением заброшенных сельхозугодий (Delgerjargal et al., 2020).

Деградация многолетней мерзлоты приводит к формированию термокарстовых форм рельефа, активизируясь на участках с нарушенной растительностью. В Якутии глубина сезонного протаивания почв увеличилась с 0,7-0,8 м (1970-х гг.) до 1 м и более. В результате избыточно увлажняются лесные почвы, переполняются озера, усиливаются летние паводки (Десяткин, 2018).

Прогнозируемые изменения климата будут способствовать усилению большинства воздействий (как биотических, так и абиотических) в лесах Северной Евразии (Seidl et al., 2017). Согласно модельным расчетам, в XXI веке в российских лесах ожидается рост площади выгорания (Eliseev et al., 2014; Елисеев, Васильева, 2020) и интенсивности засух (Ukkola et al., 2020), обусловленный в том числе ожидаемым учащением блокирующих антициклонов (Мохов, Тимажев, 2019). Рост повторяемости условий, благоприятных для развития опасных конвективных явлений (Чернокульский и др., 2017), будет приводить к увеличению количества молниевых разрядов (Chen et al., 2021) и, соответственно, к повышению вероятности возникновения пожаров (Krause et al., 2014; Елисеев и др., 2019). Наиболее значительный рост числа пожаров ожидается для более жестких сценариев потепления (Eliseev et al., 2014; Son et al., 2021).

Важной также является тенденция изменения осадков: в более теплом и влажном климате (прогнозируется для северных регионов России) можно ожидать существенный рост ветрового воздействия (в первую очередь, на ЕТР) и умеренный рост биогенных воздействий, в более теплом и сухом климате (для южных регионов России) ожидается существенный рост воздействия засух, пожаров и биогенных воздействий (Seidl et al., 2017). При этом наблюдается усиление уязвимости лесных экосистем к биогенным воздействиям, особенно в северных регионах (Forzieri et al., 2021).

К середине XXI века увеличение среднемноголетней мощности сезонноталого слоя на севере Западной Сибири составит 30 ± 14 см по сравнению со средним за период 1961-1990 гг., в то время как на большей части криолитозоны Восточной Сибири ожидаются меньшие изменения – 20 ± 1 см (Анисимов, Кокорев, 2017).

Вместе с тем отмечается неопределенность модельных оценок изменения уязвимости лесных экосистем к последствиям изменений климата (Kloster, Lasslop, 2017; Li et al., 2018), обусловленная как недостаточно детальным описанием прямых и косвенных эффектов (Seidl et al., 2017), так и недостаточным учетом обратных связей между экосистемами и климатом (Marchal et al., 2020).

Как отмечалось во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), степные и пустынные биомы подвержены волнам тепла, засухам и пожарам. Засухи, повторяющиеся с 2016 г., привели к иссушению почвенного покрова, появлению пылевых бурь, большому числу пожаров, значительному сокращению продуктивности пастбищ, что подтверждается данными индекса NDVI (Национальный доклад, 2021).

Максимальный риск возникновения разрушительных пожаров для территории страны отмечается в августе. Причем наиболее подвержены не лесные, а степные и лесостепные биомы ЕТР (Национальный доклад, 2021; рис. 2.1.1.7).

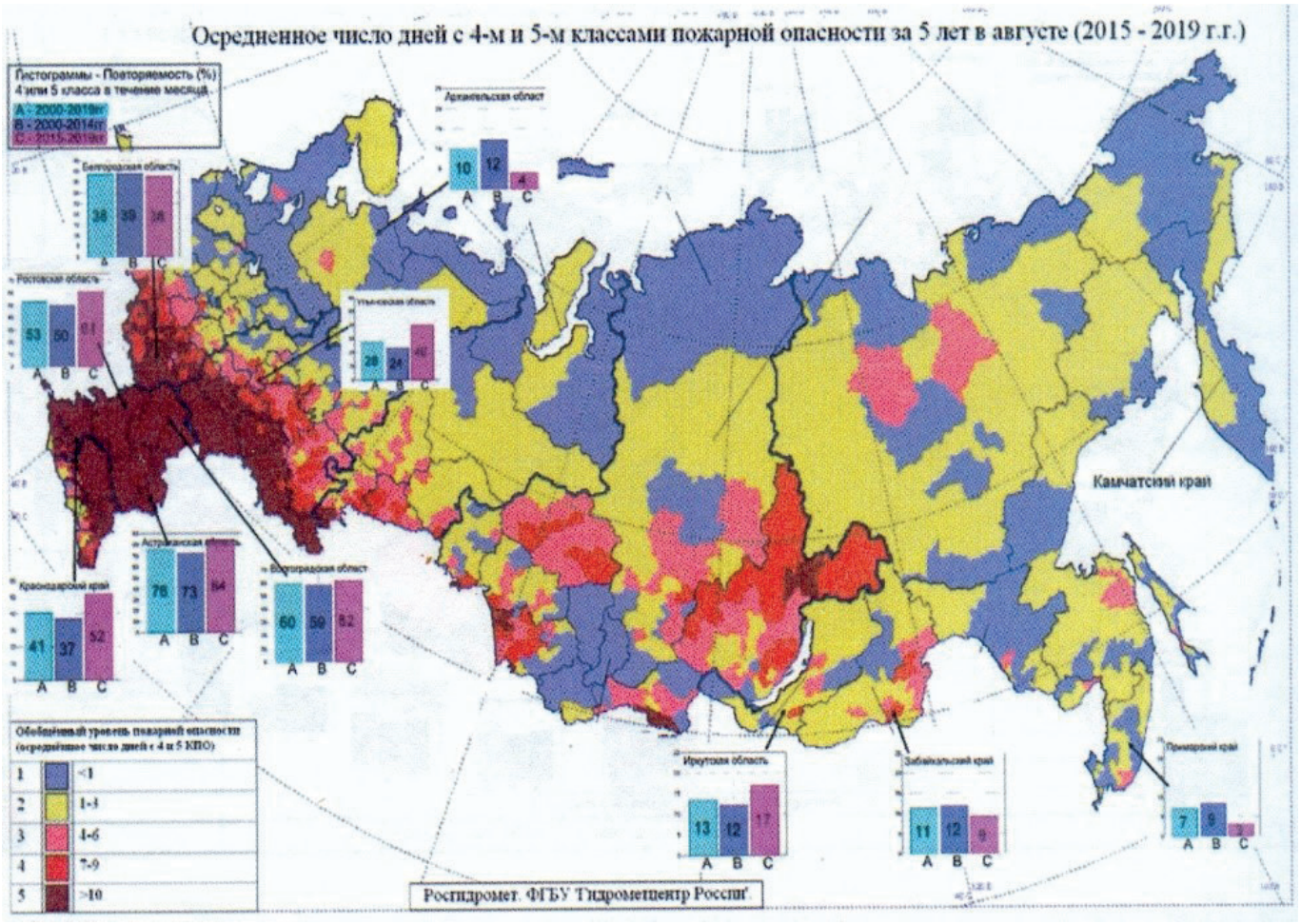



***Рис. 2.1.1.7*** *Обобщенный уровень пожарной опасности, отображающий число дней с 4-м и 5-м классом пожарной опасности за август пожароопасного сезона в 2015-2019 гг. и гистограммы их повторяемости для 2000-2019, 2000-2014, 2015-2019 гг. (Национальный доклад, 2021)*

Чрезмерная антропогенная нагрузка приводит к увеличению площади пустынь и сокращению продуктивности экосистем. Дефицит влаги может способствовать смещению как южной, так и северной границ степей на север (Шестой национальный, 2020). Пыльные бури усиливают деградацию экосистем и способствуют нарастанию процессов опустынивания (Шинкаренко и др., 2020).

Тенденции изменения высотной поясности в пределах оробиомов были описаны выше. Геометрически сдвиг пояса растительности вверх по склонам гор приводит к сокращению его площади даже при сохранении его ширины (Шестой Национальный, 2020). Наиболее уязвимыми являются верхние пояса гор, не имеющие возможности для пропорционального сдвига. Отступание нивального пояса и повышение температур пород (Biskaborn et al., 2019) идентифицируется через деградацию ледников. Согласно (Khromova et al., 2019), наибольшие темпы уменьшения площади ледников (на 60-70%) отмечены для Корякского нагорья и хребта Орулган (Якутия). За предшествующие 30 лет произошло значимое сокращение оледенения во всех крупных системах: на Кавказе – на 17%, на Алтае – 27%, на Камчатке – 11%, что подтверждает тренды, представленные во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014).

Ситуация усугубляется высокой подверженностью горных территорий опасным гидрометеорологическим явлениям и их последствиям (Анализ и прогноз, 2018). Даже незначительное нарушение экосистем приводит к каскадному эффекту и возникновению лавин, селей, оползней, увеличению масштабов разрушений (Шестой Национальный, 2020; Крыленко и др., 2012; Онищенко и др., 2019; Рудинская и др., 2019). В результате активизации процессов деградации ледников происходит разрушение моренных отложений, спуск ледниковых озер, увеличение объемов речного стока и его обогащение каменным материалом, усиление склоновых, нередко значительных процессов типа камнепадов, грязекаменных потоков, селей (Онищенко и др., 2019). Селевые потоки в значительной степени уничтожают растительность в зоне транзита, в зоне аккумуляции частота селей может превышать скорость восстановления растительности, формируя участки «стабильно нарушенных» экосистем (Рудинская и др., 2019).

Для болот наряду с общим ростом вероятности природных пожаров (Jia et al., 2019) повсеместно растет опасность торфяных пожаров. Их отличает длительность горения (Hu et al., 2018; Jia et al., 2019), большие по сравнению с другими природными пожарами потери углерода, выброс парниковых газов (Сирин и др., 2019а) и особо опасных для человека продуктов горения (Sirin et al., 2020), гибель древостоя и сложная идентификация по дистанционным данным (Медведева и др., 2020). Снижение водности болот при изменении климата и осушении увеличивает частоту и масштабы торфяных пожаров (Turetsky et al., 2015), заглубление огня и потери углерода (Глухова, Сирин, 2018). Наиболее пожароопасны неиспользуемые осушенные торфяники (Sirin et al., 2020). Антропогенная трансформация снижает уровень естественной устойчивости болот к климатическим изменениям, активизирует процессы их деградации, водной и ветровой эрозии (Visconti et al., 2018). Наиболее значимы изменения водного режима, изоляция болотных массивов, усиление вероятности пожаров и других экстремальных явлений. Засухи и снижение продуктивности пастбищ ведут к смещению домашнего скота на более влажные местообитания, торфяные почвы которых менее устойчивы (Faridah-Hanum et al., 2018; Ильясов и др., 2017, 2018; Природные условия, 2018).

Во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) уже отмечалось, что для водных систем суши наиболее значимые изменения, связанные с изменениями климата, проявляются в изменении стока и увеличении частоты опасных явлений (Джамалов и др., 2016; Киреева и др., 2018; Фролова и др., 2020; Добровольский и др., 2018; Золина, Булыгина, 2016; Семенов, 2018). Более подробная информация приведена в главе 1.2.1.

Особо чувствительными к изменениям климата становятся горные реки с ледниковым питанием, водный баланс которых на фоне интенсивного роста температуры воздуха уже значительно изменился. Согласно (Rets et al., 2020), пик водного стока ледников в центральной части Северного Кавказа уже пройден. В речных бассейнах с покрытием ледниками более 1% площади наблюдается последовательное снижение среднемесячного расхода воды в июле и августе (на 4-6% за десятилетие в период 1945-2018 гг.).

На месте отступающих ледников в нивальном поясе образуются озера. В работе (Лаврентьев и др., 2020) установлено, что площадь потенциальных озер, угрожающих объектам инфра-

структуры на Кавказе, может достичь 1,7 км$^2$, а объем – 130 млн м$^3$. В 2017 г. произошел катастрофический прорыв оз. Башкара, с формированием селевого паводка, который привел не только к значительным переформированиям русла реки и речной долины, но также к разрушениям зданий, инфраструктуры и человеческим жертвам (Черноморец и др., 2018).

В зоне арктической тундры в среднем проявляется тенденция роста площади термокарстовых озер, в субарктической тундре – ее сокращения, а в зоне лесотундры значительных изменений не выявлено (Брыксина, Полищук, 2015; Полищук и др., 2017). Образование новых озер, как правило, приурочено к зоне распространения сплошной мерзлоты, а исчезновение – к зоне прерывистой (Полищук, Полищук, 2016).

Увеличение температуры воды приводит к уменьшению содержания растворенного кислорода, особенно в сухие и теплые периоды, что, в свою очередь, способствует повышению уровня загрязнения рек (Karthe et al., 2017). Еще более уязвимыми являются озера и водохранилища в связи с формированием более устойчивой вертикальной стратификации и снижением темпов перемешивания воды, и, наоборот, усилением процесса эвтрофикации вод и изменением мест обитания водных организмов (Фефилова и др., 2014). Например, за последние 60 лет в озерах Карелии (Георгиев, Назарова, 2015; Терентьев и др., 2017), Севера Урала и Западной Сибири (Аврунев и др., 2016) указанные процессы выражаются в снижении числа лососевых и сиговых видов рыб и увеличении численности видов с малой промысловой ценностью. В береговой зоне оз. Байкал были обнаружены признаки эвтрофикации (Potemkina et al., 2018). Учитывая прогнозируемое снижение водности Селенги в течение XXI века на 10-40% в зависимости от периода, наиболее вероятно обострение гидроэкологических проблем на Байкале (Морейдо, Калугин, 2017).

Прогнозируется продолжение падения уровня воды Каспия и Ладожского озера в ближайшие годы, но в период 2035-2070 гг. ожидается рост осадков и повышение уровня этих водоемов (Выручалкина и др., 2016). Особо чувствительными к климатическим изменениям являются крупные соленые озера России. Например, увеличение площади оз. Чаны в Новосибирской области в среднем на 18% (относительно периода 1971-2000 гг.) за счет большего количества осадков (Kondakova et al., 2020) привело к снижению минерализации воды и увеличению видового разнообразия флоры и фауны (Bezmaternykh, 2016). Пример Торейских озер в Забайкалье (оз. Зун-Торей и оз. Барун-Торей) показывает, что под влиянием стабильного снижения увлажнения территории даже довольно крупные озера могут полностью пересыхать, что было отмечено в 2008-2017 гг. (Баженов, 2019).

### 2.1.1.7 Возможные направления адаптации видов и экосистем

Естественная адаптация видов к изменениям климата остается слабо изученной. В литературе появляются отдельные примеры поведенческой адаптации. Например, белые медведи на побережье Карского моря вынуждены добывать корм на суше, что привело к изменению структуры питания (Сыроечковский и др., 2018). По сравнению со Вторым оценочным докладом Росгидромета (Росгидромет, 2014) в публикациях расширился спектр мер по адаптации видов и экосистем к изменениям климата. В Национальную Стратегию (2014) была включена специальная целевая задача: «К 2020 году в России сведены к минимуму антропогенные

нагрузки на экосистемы и предприняты адаптационные меры в регионах, уязвимость которых к изменениям климата проявилась наиболее четко: арктические, субарктические, дальневосточные, горные, степные», что отражает позицию Конвенции о биологическом разнообразии: в качестве основной меры по адаптации экосистем к изменению климата определено снятие антропогенной нагрузки (КБР, 2010).

В Шестом Национальном докладе (2020) к территориям, снижение антропогенной нагрузки на которые внесло вклад в адаптацию уязвимых экосистем к изменениям климата, были отнесены следующие категории: все особо охраняемые природные территории (ООПТ); их охранные зоны; территории традиционного природопользования (ТТП); рыбоохранные зоны и рыбохозяйственные заповедные зоны; защитные леса, особо защитные участки лесов, резервные леса; округа санитарной (горно-санитарной) охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов; охотничьи угодья и зоны охраны охотничьих ресурсов; водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы. Максимально была снижена антропогенная нагрузка на ООПТ (238,8 млн га), а площадь территорий с установленным режимом ограничений оценивается приблизительно в три раза больше (Шестой Национальный…, 2020).

Антропогенная деятельность также может усиливать или ослаблять последствия изменений климата (Anderegg et al., 2020), например, влияя на риск появления и скорость тушения пожаров (Eliseev et al., 2014; Knorr et al., 2016), снижая жизнеспособность лесов через загрязнение воздуха и почвы (Prăvălie, 2018). Как правило, предлагаемые методы адаптации для сохранения видов и экосистем не являются новыми в сфере охраны природы. К ним относятся:

– снижение «обычных» факторов воздействия: браконьерства, беспокойства, химического загрязнения и т.д. и введение режима благоприятствования для естественной (автономной) адаптации видов и экосистем;
– поддержание режима «здорового» функционирования экосистем и выполнения ими важных экологических функций;
– создание миграционных коридоров для естественного переселения видов на более благоприятные по природным условиям территории в связи со смещением природных зон и сдвигом высотных поясов растительности;
– контроль за распространением «южных» видов и болезней;
– прямая поддержка популяций при неблагоприятных условиях: подкормка, создание климатических убежищ. Для видов, которые из-за изменения климата оказываются под угрозой исчезновения, возможно создание размножающихся популяций в зоопарках (Mawdsley et al., 2009; Watson et al., 2012; Schmitz et al., 2015; Экологическая реставрация, 2016; Липка, Кокорин, 2016; Медведева и др.. 2017, 2020; Sirin et al., 2017, 2018; Reside et al., 2018; Beever et al., 2016; Природные условия, 2018; Hilty et al., 2019);
– обводнение пожароопасных торфяников Московской области показало снижение масштабов торфяных пожаров (Sirin et al., 2020).

Меры адаптации для лесного хозяйства рассмотрены в главе 2.3.4.

В рамках минимизации последствий глобального кризиса опыления предлагаются меры по адаптации, способствующие сохранению местообитаний диких опылителей, оптимизация агроландшафтов и севооборотов, выведение новых сортов сельхозкультур с соответствующими сроками фенологических дат, снижение

количества применяемых токсичных веществ и др. (Ченикалова, Черкашин, 2019; Decourtye et al., 2019; Крыленко, Ясюкевич, 2021).

Одним из действенных инструментов для адаптации видов и экосистем является система ООПТ (Шестой Национальный…, 2020). В табл. 2.1.1.3 представлены возможности интеграции мер адаптации в стандартную схему среднесрочного плана управления ООПТ (Lipka, Kanzai, 2020).

***Таблица 2.1.1.3***

*Примеры возможного включения мер по адаптации к изменениям климата в разделы плана управления ООПТ (Lipka, Kanzai, 2020)*

| Раздел плана управления ООПТ | Прямые адаптационные меры/исследования | Дополнительные адаптационные меры |
|---|---|---|
| Научное обоснование расширения территории | Экологические коридоры<br>Климатические убежища<br>Недостаточная емкость среды обитания вследствие аридизации и т. д. | Изменения природных условий в ближайшие 30–50 лет по прогнозам Росгидромета учитываются при обосновании нового кластера |
| Снижение угрозы охраняемым природным комплексам и объектам от инвазивных видов животных и растений | Регулирование численности инвазивных видов, предотвращение их акклиматизации | Мониторинг внедрения и численности популяций инвазивных видов |
| Сохранение редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных (включая увеличение численности их кормовой базы) | Биотехнические мероприятия при неблагоприятных погодных условиях (искусственные водоемы, подкормка и т. д.)<br>Создание экологических коридоров для успешной миграции ценных и редких видов в места с более благоприятными для них условиями | Оценка климатических рисков по каждому приоритетному виду, включая изменения среды обитания и всю трофическую цепь |
| Повышение продуктивности экосистем | Лесохозяйственные и биотехнические мероприятия в целях уменьшения риска/последствий неблагоприятных погодных явлений | Прогнозы динамики экосистем в связи с изменением климата |

| | | |
|---|---|---|
| Борьба с лесными вредителями и болезнями | Деятельность, разрешенная в соответствии с Положением об ООПТ | Прогноз изменения ареалов видов вредителей и распространения болезней леса |
| Предотвращение пожаров | Профилактические мероприятия;<br>Расчет необходимого оборудования и ресурсов производятся не на основе статистики, а по прогнозам Росгидромета | Картирование территории по степени риска возникновения пожаров: климатические условия / частота и характер посещения – возможность неосторожного обращения с огнем |
| Инвентаризация картографической информации | Карты риска стихийных бедствий;<br>Карты потенциальных изменений растительности;<br>Карты зарегистрированных и прогнозируемых изменений ареалов приоритетных видов и доминантов экосистем | Карты отдельных компонентов экосистем и антропогенных нарушений |
| Разработка перспективного плана научных (проблемных) исследований | Анализ последствий изменения климата для ООПТ в соответствии с климатическими прогнозами Росгидромета;<br>Роль ООПТ в снижении климатических рисков для прилегающих территорий;<br>Вклад изменения климата и других антропогенных факторов в динамику экосистем (деградация и восстановление) | Большинство пространственно-ориентированных исследований |
| Разработка программы экологического мониторинга (в соответствии с установленными приоритетами), четко определяющей направления мониторинга | Сбор гидрологических и метеорологических данных;<br>Мониторинг фенологических явлений;<br>Мониторинг изменений растительности и использование данных дистанционного зондирования;<br>Мониторинг изменения местообитаний и ареалов видов;<br>Мониторинг инвазивных видов | Мониторинг изменения биоразнообразия на количественном и качественном уровнях; состояния популяций, состояния экосистем: продолжение долгосрочных наблюдений за природными объектами и явлениями (проводится более 10 лет и т. д.) |

В качестве оценки эффективности антропогенной адаптации экосистем предлагается, например, использовать значение изменения общего запаса углерода в расчете на единицу площади, который не должен быть отрицательным (Романовская, 2018).

### 2.1.1.8 Возможные направления адаптации на основе экосистем

Адаптация к изменениям климата на основе экосистем (или «адаптация с позиций экосистем», Ecosystem-based Adaptation, EbA) подразумевает «использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг в рамках общей стратегии адаптации, чтобы способствовать улучшению благосостояния общества, в том числе коренных народов и местных общин, и чтобы помочь людям адаптироваться к неблагоприятным последствиям изменения климата» (КБР, 2018).

Из всего разнообразия экосистемных услуг (Экосистемные услуги, 2016) для адаптации наиболее часто используются средообразующие (регулирующие) (Липка, Богданович, 2021; табл. 2.1.1.4).

***Таблица 2.1.1.4***

*Примеры средообразующих экосистемных услуг, наиболее часто применяемых для адаптации к изменениям климата (Липка, Богданович, 2021)*

| Среда | Эффект |
|---|---|
| атмосфера | снижение силы ветра – уменьшение ущерба от ураганов |
| | формирование облаков, увеличение количества осадков над залесенными территориями |
| | создание благоприятного микроклимата, включая смягчение волн тепла |
| гидросфера | увеличение меженного стока в засушливый сезон |
| | снижение интенсивности паводков и наводнений, а также причиняемого ими ущерба |
| почвы | формирование почв, повышение уровня их плодородия |
| | защита от ветровой и водной эрозии в агроландшафтах, в горных условиях и др. |
| | регуляция криогенных процессов (предотвращение и замедление таяния мерзлоты) |

Эффективность облесения территории для создания более благоприятного микроклимата и защиты от волн тепла была подтверждена в ходе модельных исследований (Olchev et al., 2018; рис. 2.1.1.8).

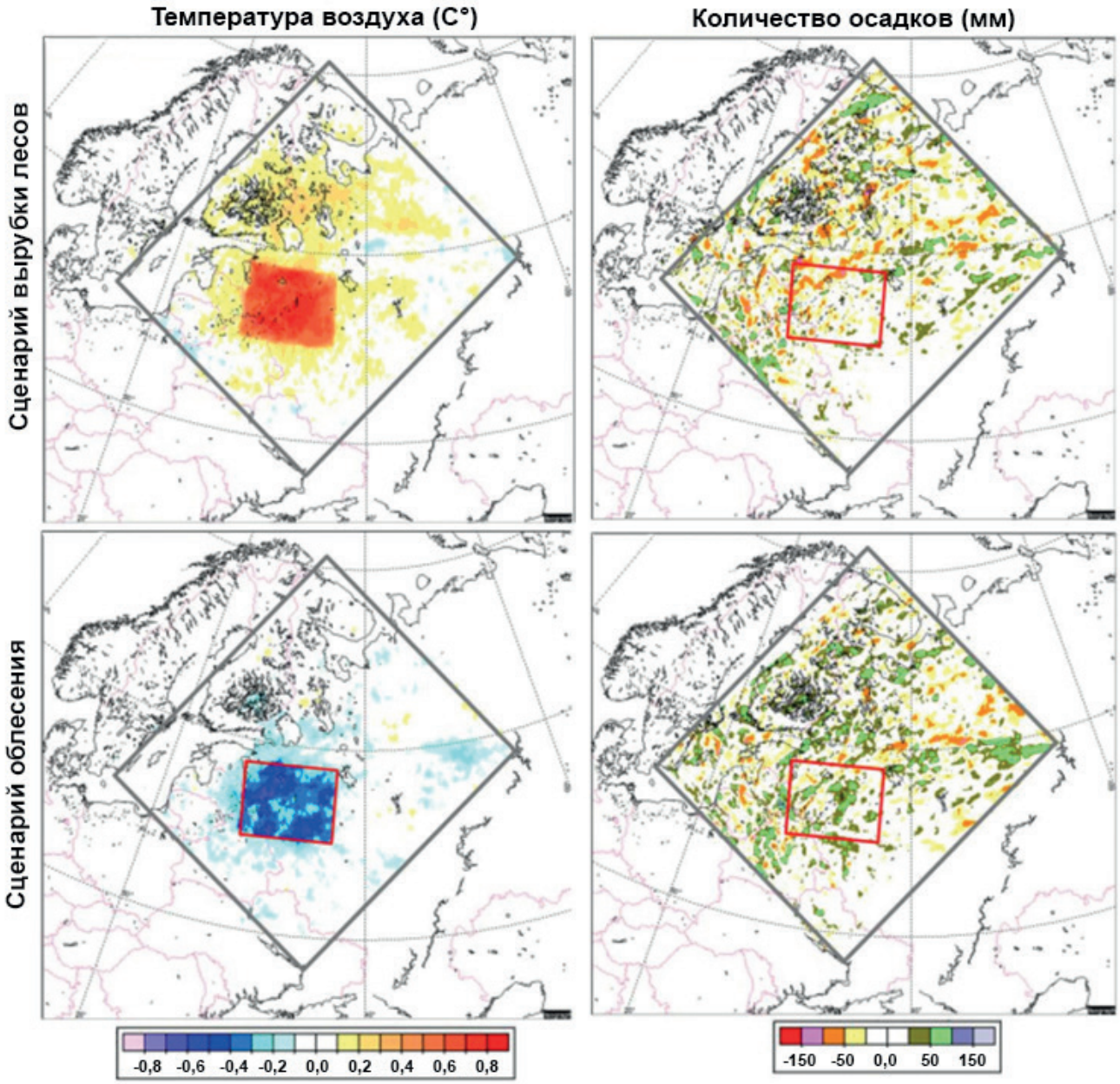



***Рис. 2.1.1.8*** *Различия температуры воздуха (°С) и количества осадков (мм) для выбранных территорий между сценариями обезлесения и облесения в модельном регионе (красный прямоугольник) и контрольный эксперимент, предполагающий существующую структуру землепользования на весь период моделирования с мая по сентябрь 2010 г. (Olchev et al., 2018)*

На безлесных площадях в центре ЕТР до 65% от годовой суммы осадков поступает в реки с поверхностным стоком. Залесенность 20% территории позволяет уменьшить поверхностный сток до 14%, полная залесенность территории снижает поверхностный сток до 5% (Лихоманов, 2012).

Меры по адаптации на основе экосистем достаточно давно и успешно применяются в озеленении, сельском и лесном хозяйстве. К сожалению, значимость экосистем и предоставляемых ими услуг для защиты от стихийных бедствий на практике зачастую недооценивается, экосистемы подвергаются чрезмерной эксплуатации или трансформируются, что приводит к сокращению предоставляемого ими объема экосистемных услуг (Липка, Богданович, 2021).

Сохранение, восстановление и адаптация лесов к изменениям климата в настоящее время рассматриваются как метод адаптации и снижения ущерба от стихийных бедствий для крупных районов: ландшафтов, бассейнов рек и т.д. При этом леса составляют каркас их экологической устойчивости (Spathelf et al., 2018). Напрямую выделение защитных лесов или особо защитных участков лесов для адаптации к изменениям климата в Лесном кодексе Российской Федерации не указано, климаторегулирующая функция лесов упоминается только для лесотундровых лесов и ленточных боров. При этом около двадцати категорий защитных лесов и особо защитных участков частично выполняют функции по адаптации регионов к изменениям климата и снижению ущерба от опасных гидрометеорологических явлений (Лесной кодекс, 2006; Липка, Богданович, 2021).

В агроландшафтах эффективно противодействовать многим неблагоприятным климатическим условиям помогают лесные полосы, которые предупреждают дефляцию почвы, удерживают снег на полях, уменьшают испарение, охраняют сельскохозяйственные культуры от суховеев, морозов и пыльных бурь (Кулик и др., 2017). Травянистая и кустарниковая растительность в 2-4 раза замедляет процессы на осыпных склонах в высокогорьях (Фисун и др., 2014). Перенос илисто-песчаных масс пыльными бурями предлагается использовать для реабилитации земель, занятых солончаками: с помощью искусственных систем задержания пыли можно сформировать равномерный слой, уже содержащий семена трав. После выпадения дождей начинается процесс активного зарастания (Национальный доклад, 2021).

При недостаточности мер адаптации на основе экосистем для защиты от стихийных бедствий применяют их сочетание с инженерными методами защиты. Например, для снижения социально-экономического и экологического ущерба паводковой опасности на реках Кавказа и Дальнего Востока предлагается создание водохранилищ в горной части бассейнов, что позволяет снизить площадь затапливаемых территорий (Мотовилов и др., 2015; Симонов и др., 2015).

## Природные системы суши Арктической зоны Российской Федерации

Значительная протяженность территории АЗРФ как в широтном, так и в меридиональном направлении отражается в разнообразии биомов: от полярных пустынь, включая горные, и ледников арктических островов до северотаежных лесов Кольско-Карельского, Мезено-Печорского и Западносибирского северного биомов. Основные площади заняты различными типами тундр и лесотундр. Биологическое разнообразие колеблется от 75-90 видов сосудистых растений, одного – трех видов млекопитающих и 1-15 видов птиц в высокой Арктике, до 600-850 видов растений, около 40 видов млекопитающих и 130 видов гнездящихся птиц на юге. При этом максимальное разнообразие растений характерно не для наиболее продуктивных таежных биомов, а для арктических и гипоарктических тундровых биомов Чукотки (Биомы России, 2018).

Изменение южных границ тундровых биомов идет с различной скоростью: 0,3-1,0 км/10 лет для предтундровых редколесий (Белоновская и др., 2016), до 100 м/год для продвижения границы леса на ЕТР и не более 10 м/год в Сибири за последние 50 лет. Отмечаются участки практически без изменений и с отступанием границы (Rees et al., 2020). Зафиксировано продвижение редколесий и кустарников в пояс горных тундр Хибин (Mathisen et al., 2014), Урала (Шиятов, Мазепа, 2015; Моисеев и др., 2018; Sannikov et al., 2018; Fomin et al., 2020), плато Путорана (Pospelova et al., 2017; Grigor'ev et al., 2019) и других приполярных возвышенностей, а также в зону тундры Западной Сибири (Сергиенко, 2015). Согласно прогнозам, к середине XXI века гипоарктические тундровые и, частично, арктические тундровые биомы становятся пригодными для развития лесной растительности по климатическим условиям (Anisimov et al., 2017).

Происходит изменение видового разнообразия. За последние 30-40 лет выявлено исчезновение нескольких видов растений, что может быть связано с более быстрым сходом снега и «усилением присутствия» видов многолетних трав и кустарничков (Тишков и др., 2020). Отмечаются десятки новых видов птиц на Чукотке (Тишков и др., 2020), в Якутии (Десяткин, 2018). Ряд морских птиц расширяет ареал на север и восток (северная олуша и большой поморник) или продвигается на север вдоль Новой Земли (галстучник, камнешарка, тупик, большой крохаль, серебристая чайка, лесной гуменник и др.) (Тишков и др., 2020). В западной части АЗРФ наблюдается рост численности многих видов гусеобразных, малого лебедя и снижение численности уток, что связано с эффектом «позеленения» тундр (Тишков и др., 2018). Проникновение в зону тундр бореальных видов (бурого медведя и рыси) усиливает межвидовую конкуренцию, что приводит к снижению численности песца и белого медведя, а также сокращению их ареалов (Тишков и др., 2019б). Происходит фрагментация ранее сплошного ареала дикого северного оленя за счет сокращения зимних пастбищ, увеличения участков антропогенной нарушенной тундры, а также увеличения мощности снежного покрова в традиционных местах зимовок (Тишков и др., 2018).

Происходит изменение фенологических дат: на 2-11 дней сдвигается на более ранние сроки зацветание и плодоношение многих видов растений (Прокошева, 2017; Бобрецов и др., 2017; Delgado

et al., 2020; Roslin et al., 2021), у птиц – сроки начала размножения (Тишков и др., 2020). Нарушилась циклическая динамика численности леммингов на всей территории АЗРФ (Тишков и др., 2018).

Средние показатели запасов и продукции фитомассы выросли на 10-15% по сравнению с концом XX века (Тишков и др., 2018). Наблюдается формирование продуктивных древесно-кустарниковых покровов в ряде мест российской Арктики. Максимальные изменения индекса NDVI отмечаются на Кольском п-ове, в западной части Большеземельской тундры, Западной и Восточной Сибири (Титкова, Виноградова, 2019).

Высокоарктические, арктические тундровые и гипоарктические тундровые биомы претерпевают значительные изменения в связи с быстрым ростом температуры в Арктике, усиливающим таяние многолетней мерзлоты и связанную с ней динамику ландшафтов. Отмечаются: размывание берегов рек и морских побережий, засухи, наводнения, ураганы/штормы, пожары в тундре. Нарушение растительного покрова приводит к многократному усилению процессов деградации мерзлоты (Шестой Национальный…, 2020), что соответствует выводам Второго оценочного доклада Росгидромета (Росгидромет, 2014). Перестройки экосистем АЗРФ в результате совместного действия природных и антропогенных изменений в последние десятилетия охватили 10-20% площади. «Позеленение» тундры выступает драйвером дальнейших перестроек в состоянии арктической биоты через изменение продуктивности экосистем, сроки вегетации, биологическую активность почв и трансформацию местообитаний (Тишков и др., 2018).

Факторы уязвимости видов и экосистем разнообразны. В том числе причиной сокращения численности видов может являться повышение температуры поверхностных вод и временной сдвиг доступности пищевых объектов, сроки схода снежного покрова, межгодовые колебания температуры поверхностного морского слоя воды в весенний период (Тишков и др., 2018). Отмечаются каскадные эффекты изменений климата для отдельных видов. Так, белый медведь, появившийся в связи с изменением ледовой обстановки на Земле Франца-Иосифа, вынудил белую чайку покинуть значительную часть привычных мест гнездования и использовать более труднодоступные для хищника местообитания (Гаврило, 2018).

Данные дистанционного зондирования подтверждают ведущую роль термокарстовых, солифлюкционных и термоабразионных явлений в изменении тундровых экосистем. Деградация ландшафтов, в том числе, снижает их пригодность в качестве местообитаний для животных (Добрынин, 2018). Процесс может происходить с более высокой скоростью, чем прогнозируется при повышении среднесезонной температуры, в результате воздействия экстремальных явлений: волн тепла или сильных ливней, причем данный процесс необратим и уже отмечается для арктических тундровых биомов (Liljedahl et al., 2016).

В лесных районах АЗРФ в 1958-2018 гг. прослеживается тенденция увеличения числа лесных пожаров, вызванных грозами (Князев, Исаева, 2019).

На значительном протяжении арктического побережья наблюдается разрушение и отступание береговой линии со средней скоростью от менее 0,5 до 2-5 м/год. При неблагоприятном сочетании экстремальных погодных явлений и антропогенных нарушений возможна катастрофическая активизация процессов, в особенности в районах с широким распространением подземных льдов (Огородов и др., 2020). На о. Ушакова была зафиксирована максимальная скорость разрушения берегов, сложенных льдами, – до 100-200 м/год (Алейников, Липка, 2018).

Увеличение температуры многолетнемерзлых пород сказывается на устойчивости реликтовых гидратов газов. Обнаруженные на Ямале воронки и формирующиеся на их месте озера правильной формы до 200 м в диаметре связывают с пневмовыбросами газа (Аржанов и др., 2016).

В зоне арктической тундры Западной Сибири в среднем проявляется тенденция роста площади озер, в субарктической тундре – тенденция ее сокращения, а в зоне лесотундры особенностей изменения площади озер во времени не выявлено (Брыксина, Полищук, 2015). При этом образование новых озер в основном происходит в зоне сплошной мерзлоты, а исчезновение – в зоне прерывистой мерзлоты (Полищук, Полищук, 2016).

Прогнозируемые изменения климата (Жильцова, Анисимов, 2015; Anisimov et al., 2017) создают благоприятные условия для потенциального развития лесной растительности на большей части АЗРФ. Океан исключает возможность отступания природных зон севернее, что может привести к сокращению биоразнообразия арктических видов (Шестой Национальный, 2020). Архипелаги в будущем могут остаться единственными фрагментами равнинных тундр и полярных пустынь на территории России (Anisimov et al., 2017).

В качестве мер по адаптации экосистем возможны: охрана, в том числе от пожаров, снижение антропогенной нагрузки и предотвращение нарушения целостности растительного покрова для уменьшения скорости деградации многолетнемерзлых пород (Шестой Национальный, 2020). В условиях меняющегося климата до начала расширения хозяйственного освоения территории АЗРФ целесообразно решить главную задачу сохранения арктического биоразнообразия – расширить сеть ООПТ, доведя их площадь до 20-30% от площади биомов (Тишков и др., 2018).

## Список литературы


**Аврунев Е. И., Крупинин Н. Я., Лебедева Т. А., 2016:** Влияние изменения климата на биологические ресурсы северных территорий (Урал, Западная Сибирь) // Известия Самарского научного центра РАН. – Т. 18, № 2 (2). – С. 272-275.

**Алейников А. А., Липка О. Н., 2016:** Тающие горы Дагестана – М., Всемирный фонд дикой природы (WWF). – 108 с.

**Алейников А. А., Липка О. Н., 2018:** Деградация покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок // Земля из космоса. – № 9 (25). – С. 32-39.

**Анализ и прогноз изменений климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона и на приграничных территориях Казахстана и Монголии, 2018:** – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). – 289 с.

**Ананин А. А., 2018:** Многолетняя динамика гнездовой численности лесных видов птиц северо-восточного Прибайкалья / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс. Тезисы докладов. – Тверь. – С. 5-6.

**Анисимов О. А., Жильцова Е. Л., Разживин В. Ю., 2015:** Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. – № 3. – С. 60-70.

**Анисимов О. А., Кокорев В. А., 2017:** Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей // Криосфера Земли. – № 2. – С. 3-10.

**Аржанов М. М., Мохов И. И., Денисов С. Н., 2016:** Дестабилизация реликтовых метангидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика. – № 4 (24). – С. 46-51.

**Баженов Ю. А., 2019:** Население мелких млекопитающих окрестностей Торейских озер (юго-восточное Забайкалье) в период сухой климатической фазы: динамика и связь с осадками // Сибирский экологический журнал. – Т. 26, № 1. – С. 29-41.

**Баранов А. А., Воронина К. К., 2016:** Причины и основные тенденции динамики ареалов птиц на территории Средней Сибири / В сб.: География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: материалы XI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному Дню Земли и 100-летию заповедной системы России. – Красноярск. – С. 93-97.

**Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шибанов Н. В., 2016:** Спутниковое картографирование растительного покрова России. – М.: ИКИ РАН. – 208 с.

**Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А., 2015:** Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. – № 2. – С. 83-94.

**Белов Л., Каменнова И., Минаева Т., Сирин А., Третьякова Н., 2012:** Сохранение водно-болотных угодий // Государственное управление ресурсами. – Т. 84, № 6. – С. 16-23.

**Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке-мл. А. Н., Морозова О. В., Покровская И. В., Царевская Н. Г., Тертицкий Г. М., 2016:** «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Известия РАН, серия геогр. – № 3. – С. 28-39.

**Биомы России. Карта для высших учебных заведений. Масштаб: 1: 7 500 000, 2018:** Г. Н. Огуреева (ред.). – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF).

**Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы, 2020:** Г. Н. Огуреева (ред.). – М.: ИГКЭ, 623 с.

**Бобрецов А. В., Тертица Т. К., Теплова В. П., 2017:** Влияние изменения климата на фенологию растений и животных юго-восточной части республики Коми (Печоро-Илычский заповедник) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 28, № 4. – С. 74-93.

**Богданович А. Ю., Павлова В. Н., Ранькова Э. Я., Семенов С. М., 2021:** Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 3. – С. 20-35.

**Болота, 2017:** Экологический атлас России. – М.: Феория. – С. 118-121.

**Брыксина Н. А., Полищук Ю. М., 2015:** Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. – Т. 19, № 2. – С. 114-120.

**Бурский О. В., 2020:** Смещение сроков гнездования птиц в Центральной Сибири в связи с потеплением климата: фенотипическая пластичность или генетиче-

ский сдвиг? // Журнал общей биологии. – Т. 81, № 3. – С. 208-222.

**Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование Европейского Севера, 2013:** Под ред. Н. С. Касимова, Л. Н. Карлина. – СПб.: РГГМУ. – 124 с.

**Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н., Дианский Н. А., Гусев А. В., 2016:** О прогнозе многолетних изменения уровня воды крупных озер // Труды Карельского научного центра РАН. – № 9. – С. 3-16.

**Гаврило М. В., 2018:** Смена гнездового размещения белой чайки в России как каскадный эффект климатических изменений в Арктике / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс. Тезисы докладов. – Тверь. – С. 66-67.

**Гашев С. Н., Васин А. М., Беспалова Т. Л., Есенгельденова А. Ю., 2017:** Динамика фенологических явлений в жизни млекопитающих средней тайги // Вестник Тюменского государственного университета, серия экология и природопользование. – Т. 3, № 1. – С. 47-60.

**Гашев С. Н., Курхинен Ю. П., 2015:** Динамические процессы в фауне позвоночных Западной Сибири и их причины // Вестник Тюменского государственного университета, серия экология и природопользование. – Т. 1, № 1. – С. 80-89.

**Георгиев А. П., Назарова Л. Е., 2015:** Трансформация ихтиофауны в пресноводных экосистемах республики Карелия в условиях изменчивости климата // Экология. – № 4. – С. 272-279.

**Гераськина А. П., Тебенькова Д. Н., Ершов Д. В., Ручинская Е. В., Сибирцева Н. В., Лукина Н. В., 2021:** Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. – Т. 4, № 2. – С. 1-76.

**Глухова Т. В., Сирин А. А., 2018:** Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. – № 5. – С. 580-588.

**Гордиенко Н. С., 2017:** Современные тенденции изменений климата и биоты на Южном Урале // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 28, № 5. – С. 87-99.

**Десяткин Р. В., 2018:** Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны северного полушария // Вестник РАН. – Т. 88, № 12. – С. 1113-1121.

**Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Бугров А. А., Григорьев В. Ю., Киреева М. Б., Рец Е. П., Сафронова Т. И., Телегина А. А., Телегина Е. А., 2016:** Оценка возобновляемых водных ресурсов Европейской части России и пространственно-временной анализ их распределения // Водное хозяйство России. – № 4. – С. 18-31.

**Добровольский С. Г., Истомина М. Н., Пасечкина В. Ю., 2018:** Изменения естественных параметров экстремальных гидрологических явлений в России и в мире и вызванных ими ущербов: наводнения и засухи // Вопросы географии. – Т. 145. – С. 183-193.

**Добрынин Д. В., 2018:** Анализ динамики местообитаний арктических птиц в условиях глобальных изменений с применением временных серий космических снимков, в сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс. Тезисы докладов. – Тверь. – С. 95.

**Елисеев А. В., Васильева А. В., 2020:** Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 3. – С. 73-119.

**Елисеев А. В., Плосков А. Н., Чернокульский А. В., Мохов И. И., 2019:** Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады Академии наук. – Т. 485, № 1. – С. 76-82.

**ЕМИСС, 2021:** Количество лесных пожаров, https://www.fedstat.ru/indicator/38496.

**Ершов Д. В., Сочилова Е. Н., 2020:** Оценки прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2020 года // Вопросы лесной науки. – Т. 3, № 4. – С. 1-8.

**Жильцова Е. Л., Анисимов О. А., 2015:** Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // Арктика XXI век, серия естественные науки. – № 2 (3). – С. 48-59.

**Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Шуляк П. П., Честных О. В., 2017:** Современное сокращение стока углерода в леса России // Доклады Академии наук. – Т. 476, № 6 – С. 719-721.

**Золина О. Г., Булыгина О. Н., 2016:** Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 1. – С. 84-103.

**Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б., 2020:** Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия РАН, серия геогр. – Т. 84, № 2. – С. 207-217.

**Иванов А. Л., Столбовой В. С., 2019:** Инициатива «4 промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – № 98. – С. 185-202.

**Ильясов Д. В., Сирин А. А., Суворов Г. Г., Мартыненко В. Б., 2017:** Летние потоки диоксида углерода и метана на осушенном торфянике в условиях лесостепи, республика Башкортостан // Агрохимия. – № 1. – С. 50-62.

**Ильясов Д. В., Сирин А. А., Суворов Г. Г., Метелева М. М., Маслов А. А., Мулдашев А. А., Широких П. С., Бикбаев И. Г., Мартыненко В. Б., 2018:** Почвы и растительность антропогенно-измененного торфяника в степной зоне (на примере массива Берказан-Камыш, Башкирия) // Агрохимия. – № 12. – С. 46-59.

**Каталог ледников СССР, 1965-1982.** – М. – Л.: Гидрометеоиздат.

**КБР, 2010:** Стратегический план в области сохранения и устойчивого использования биоразнообразия на 2011-2020 годы и целевые задачи по сохранению и устойчивому использованию биоразнообразия, принятые в Айти, п. 4.2, Нагоя, КБР.

**КБР, 2018:** Рекомендация, принятая вспомогательным органом по научным, техническим и технологическим консультациям, п. 22/7: Биоразнообразие и изменение климата: подходы с позиций экосистем к адаптации к изменению климата и уменьшению опасности стихийных бедствий, п. 9, Монреаль, КБР, 29 с., https://www.cbd.int/doc/recommendations/sbstta-22/sbstta-22-rec-07-ru.pdf

**Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Рец Е. П., Самсонов Т. Е., Телегина Е. А., Харламов М. А., Езерова Н. Н., Пахомова О. М., 2018:** Паводочный сток на реках Европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России. – № 4. – С. 48-68.

**Князев Н. В., Исаева Л. Г., 2019:** Лесные пожары в Мурманской области и возникновение пожаров от гроз / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 49-50.

**Котляков В. М., Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Попова В. В., Чернова Л. П., Муравьев А. Я., Рототаева О. В., Никитин С. А. Зверкова Н. М., 2015:** Современные изменения ледников горных районов России. – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 288 с.

**Кренке А. Н., Ананичева М. Д., Демченко П. Ф., Кислов А. В., Носенко Г. А., Поповнин В. В., Хромова Т. Е., 2012:** Ледники и ледниковые системы. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – С. 360-399.

**Крыленко В. В., Липка О. Н., Алейникова А. М., 2012:** Анализ устойчивости естественных и техногенных ландшафтов Черноморского побережья России к воздействию ливней экстремальной интенсивности (на примере ливня 6-7 июля 2012 г.) // Вестник Российского университета дружбы народов, серия экология и безопасность жизнедеятельности. – № 4. – С. 82-92.

**Крыленко С. В., Ясюкевич В. В., 2021:** Кризис опыления и вклад в него изменений климата // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 7, № 3. – С. 15-49.

**Кудеяров В. Н., 2018:** Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. – № 6. – С. 643-658.

**Кулик К. Н., Рулев А. С., Ткаченко Н. А., 2017:** Изменения климата и агролесомелиорация // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – № 2 (46). – С. 58-67.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Жиенгалиев А. Т., Кудеяров В. Н., 2019:** Углеродный бюджет степных экосистем России // Доклады Академии наук. – Т. 485, № 6. – С. 732-735.

К**ухта А. Е., Попова Е. Н., 2020:** Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря / В сб.: Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны. – М.: ИГКЭ. – С. 48-50.

**Лаврентьев И. И., Петраков Д. А., Кутузов С. С., Коваленко Н. В., Смирнов А. М., 2020:** Оценка потенциала развития ледниковых озер на Центральном Кавказе // Лед и Снег. – Т. 60, № 3. – С. 343-360.

**Лесной кодекс Российской Федерации, 2006:** М.: Государственная дума, от 04.12.2006, http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102110364

**Липка О. Н., Богданович А. Ю., 2021:** Адаптация к изменениям климата на основе экосистем как биотехнологический процесс / В сб.: Инновационные технологии

защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Казань: КНИТУ. – С. 1865-1870.

**Липка О. Н., Кокорин А. О., 2016:** Адаптация к изменениям климата для сохранения биоразнообразия // Использование и охрана природных ресурсов в России. – № 1. – С. 54-60.

**Лихоманов О. В., Бубнов Д. В., 2012:** Денежная оценка средозащитных функций леса (на примере лесов и лесных насаждений Волгоградской области) // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия: Экономика. Экология. – № 2. – С. 214-220.

**Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Бурцев М. А., Дмитриев В. В., Сенько К. С., Крашенинникова Ю. С., 2019:** Лесные пожары на территории России: особенности пожароопасного сезона 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 16, № 5, с. 356-363.

**Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., 2017:** Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 14, № 6. – С. 158-175.

**Медведева М. А., Возбранная А. Е., Сирин А. А., Маслов А. А., 2017:** Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок // Исследование Земли из космоса, № 3, с. 76-84.

**Медведева М. А., Макаров Д. А., Сирин А. А., 2020:** Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 17, № 5. – С. 157-166.

**Моисеев П. А., Гайсин И. К., Бубнов М. О., Моисеева О. О., 2018:** Динамика древесной растительности на участках остепненных склонов Южного Крака в последние 80 лет // Экология. – № 2. – С. 157-162.

**Морейдо В. М., Калугин А. С., 2017:** Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI веке на основе модели формирования стока // Водные ресурсы. – Т. 44, № 3. – С. 275-284.

**Морские млекопитающие Российской Арктики и Дальнего Востока: атлас, 2017:** – М.: Арктический Научный Центр. – 311 с.

**Мотовилов Ю. Г., Данилов-Данильян В. И., Дод Е. В., Калугин А. С., 2015:** Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // Водные ресурсы. – Т. 42, № 5. – С. 476-491.

**Мохов И. И., Бондур В. Г., Ситнов С. А., Воронова О. С., 2020:** Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокированиями // Доклады РАН. Науки о Земле. – Т. 495, № 2. – С. 61-66.

**Мохов И. И., Тимажев А. В., 2019:** Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 5-16.

**Мусолин Д. Л., Саулич А. Х., 2012:** Реакции насекомых на современное изменение климата: от физиологии и поведения до смещения ареалов // Энтомологическое обозрение. – Т. 91, № 1. – С. 3-35.

**Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)», 2021:** – М.: ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В. В. Докучаева. – 700 с.

**Огородов С. А., Баранская А. В., Белова Н. Г., Кокин О. В., Маслаков А. А., Алексютина Д. М., Мазнев С. В., Новикова А. В., Селюженок В. В., Шабанова Н. Н., Вергун А. П., Кондратьева Д. М., 2020:** Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны российской Арктики. – М. – 68 с.

**Онищенко В. В., Тохчуков Ш. Ю., Тамбиева А. Б., 2019:** Постгляциальное ландшафтообразование северо-западного Приэльбрусья в условиях изменяющегося климата / В сб.: Актуальные направления сбалансированного развития горных территорий в контексте междисциплинарного подхода. – Карачаевск. – С. 37-45.

**Плотникова А. С., Ершов Д. В., Харитонова А. О., Шуляк П. П., Барталев С. А., Стыценко Ф. В., 2019:** Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 16, № 5. – С. 228-240.

**Полищук Ю. М., Куприянов М. А., Брыксина Н. А., 2017:** Дистанционное исследование динамики площади озер в сплошной криолитозоне Сибири // География и природные ресурсы. – № 3. – С. 164-170.

**Полищук Ю. М., Полищук В. Ю., 2016:** Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения размеров термокарстовых озер на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. – Т. 20, № 2. – С. 32-40.

**Природные условия и биота Природного парка «Аслы-Куль», 2018:** Б. М. Миркин, В. Б. Мартыненко (ред.). – Уфа: Гилем. – 456 с.

**Прокошева И. В., 2017:** Динамика фенологических процессов в горнотаежном поясе Вишерского заповедника (Северный Урал) под влиянием климатических изменений // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 28, № 2. – С. 40-55.

**Романовская А. А., 2018:** Потребности и пути развития мониторинга адаптации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 29, № 1. – С. 107-126.

**Романовская А. А., Трунов А. А., Коротков В. Н., Карабань Р. Т., 2018:** Проблема учета поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. – № 5. – С. 323-334.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (В. М. Катцов, С. М. Семенов, ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Рудинская А. И., Беляев Ю. Р., Гуринов А. Л., Гаранкина Е. В., Беляев В. Р., 2019:** Воздействие селевых потоков на долинные экосистемы Ловозерских тундр / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 77-79.

**Семенов В. А., 2018:** Территориальные и временные изменения частоты опасных гидрологических явлений на реках России при современном климате // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – Т. 181. – С. 88-101.

**Семенов С. М., Попов И. О., Ясюкевич В. В., 2020:** Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 59-65.

**Сергиенко В. Г., 2015:** Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. – № 1. – С. 5-19.

**Симонов Е. А., Егидарев Е. Г., Меньшиков Д. А., Халяпин Л. Е., Королев Г. С., 2015:** Комплексная эколого-экономическая оценка развития гидроэнергетики бассейна реки Амур – М.: WWF России, En+Group. – 279 с.

**Сирин А. А., Макаров Д. А., Гуммерт И., Маслов А. А., Гульбе Я. И., 2019а:** Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. – № 5. – С. 410-422.

**Сирин А. А., Медведева М. А., Макаров Д. А., Маслов А. А., Юстен Х., 2019б:** Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – Т. 65, № 2. – С. 321-334.

**Стратегия и План действий по сохранению биологического разнообразия Российской Федерации, 2014:** – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – 258 с.

**Сыроечковский Е. Е., Лаппо Е. Г., Гаврило М. В., Розенфельд С. В., Расс Р., 2018:** Хищничество белого медведя – новый фактор, снижающий успех размножения птиц в высокоширотной российской Арктике / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс. Тезисы докладов. – Тверь. – С. 322-323.

**Терентьев П. М., Кашулин Н. А., Зубова Е. М., 2017:** Роль европейской корюшки Osmerus eperlanus (Linnaeus) в структуре ихтиофауны бассейна оз. Имандра (Мурманская область) // Труды Зоологического института РАН. – Т. 321, № 2. – С. 228-243.

**Тимирева С. Н., Сарана В. А., Кононов Ю. М., 2016:** Оледенение долины р. Имангды (западная часть плато Путорана) в позднем плейстоцене и голоцене // Геоморфология. – № 1. – С. 82-87.

**Титкова Т. Б., Виноградова В. В., 2019:** Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 16, № 5. – С. 310-323.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Лаппо Е. Г., Морозова О. В., Покровская И. В., Тертицкий Г. М., Титова С. В., Царевская Н. Г., 2020:** Региональные биогеографические

эффекты «быстрых» изменений климата в российской Арктике в XXI в. // Арктика: экология и экономика. – № 2 (38). – С. 31-44.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тертицкий Г. М., 2018:** «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты. Арктика: экология и экономика. – № 2. – С. 31-44.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Титова С. В., Царевская Н. Г., Шматова А. Г., 2019а:** Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. – № 4(36). – С. 38-51.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М., Титова С. В., 2019б:** Современная климатогенная динамика арктической биоты. Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 193-195.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Кренке А. Н., Титова С. В., Царевская Н. Г., 2021:** Изменения биологической продуктивности наземных экосистем Российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. – Т. 11, № 1. – С. 30-41.

**Торопов П. А., Алешина М. А., Носенко Г. А., Хромова Т. Е., Никитин С. А., 2020:** Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 118-130.

**Фефилова Е. Б., Батурина М. А., Кононова О. Н., Лоскутова О. А., Хохлова Л. Г., Дубовская О. П., 2014:** Многолетние изменения в сообществах гидробионтов в Харбейских озерах // Журнал Сибирского федерального университета, Серия «Биология». – Т. 7, № 3. – С. 240-266.

**Филипчук А. Н., Малышева Н. В., Золина Т. А., Югов А. Н., 2020:** Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохозяйственная информация. – № 1, с. 92-114.

**Филипчук А. Н., Моисеев Б. Н., Малышева Н. В., 2017:** Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте парижского соглашения об изменении климата // Лесохозяйственная информация. – № 1. – С. 88-98.

**Фисун М. Н., Чочаев М. А., Байдаева З. Р., Егорова Е. М., Якушенко О. С., 2014:** Эффективность растительного покрова в стабилизации осыпей ландшафтов высокогорий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – № 1 (179). – С. 91-94.

**Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Харламов М. А., Самсонов Т. Е., Энтин А. Л., Лурье И. К., 2020:** Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. – № 7. – С. 14-26.

**Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф., Муравьев А. Я., Никитин С. А., Лаврентьев И. И., 2021:** Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016-2019 гг.) // Лед и Снег. – Т. 61, № 3. – С. 341-358.

**Ченикалова Е. В., Черкашин В. Н., 2019:** Пути повышения эффективности природных опылителей при органическом земледелии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – № 8. – С. 25-29.

**Черенкова Е. А., 2017:** Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 2. – С. 130-143.

**Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., 2021:** Весенне-летние засухи в степях Оренбуржья: современные изменения и модельные прогнозы / В сб.: Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума. – Т. 9. – С. 849-853.

**Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И., 2017:** Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Доклады Академии наук. – Т. 477, № 6. – С. 722-727.

**Черноморец С. С., Петраков Д. А., Алейников А. А., Беккиев М. Ю., Висхаджиева К. С., Докукин М. Д., Калов Р. Х., Кидяева В. М., Крыленко В. В., Крыленко И. В., Крыленко И. Н., Рец Е. П., Савернюк Е. А., Смирнов А. М., 2018:** Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. – Т. 22, № 2. – С. 70-80.

**Шаповалова И. Б., 2017:** Состояние биоразнообразия редких и исчезающих видов птиц внутренних водоемов степной зоны Юга России (республика Калмыкия) за 2008-2015 годы // Экосистемы: экология и динамика. – Т. 1, № 4. – С. 59-100.

**Шерстюков Б. Г., 2021:** Лесные пожары на территории России и их связь с изменяющимися метеорологическими условиями // Труды ВНИИГМИ-МЦД, Вып. 188. – С. 30-40.

**Шестой Национальный доклад «Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации», 2020:** https://chm.cbd.int/database/record?documentID=253450

**Шинкаренко С. С., Ткаченко Н. А., Барталев С. А., Юферев В. Г., Кулик К. Н., 2020:** Пыльные бури на юге европейской части России в сентябре – октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 17, № 5. – С. 291-296.

**Ширяев А. Г., Химич Ю. Р., Волобуев С. В., Морозова О. В., Королева Н. Е., Ширяева О. С., Соковнина С. Ю., Косолапов Д. А., Пейнтнер У., 2019:** «Позеленение» Арктики и климатогенная динамика высокоширотной микобиоты. В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 198-199.

**Шиятов С. Г., Мазепа В. С., 2015:** Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // Экология. – № 6. – С. 403-410.

**Эдельгериев Р. С. Х., Романовская А. А., 2020:** Новые подходы к адаптации к изменению климата на примере Арктической зоны Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 12-28.

**Экологическая реставрация в Арктике: обзор международного и российского опыта, 2016:** Т. Ю. Минаева (ред.). – Сыктывкар – Нарьян-Мар: Триада. – 288 с.

**Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада, 2016:** Услуги наземных экосистем. Е. Н. Букварева, Д. Г. Замолодчиков (ред.). – М.: Центр охраны дикой природы, т. 1. – 148 с.

**Advani N. K., 2014a:** Climate Change Vulnerability Assessment for Species. – World Wildlife Fund, Washington, DC, available at https://www.worldwildlife.org/publications/climate-change-vulnerability-assessment-for-species-5

**Advani N. K., 2014b:** WWF Wildlife and Climate Change Series: Snow leopard. – World Wildlife Fund, Washington, DC, available at https://www.worldwildlife.org/publications/snow-leopard-wwf-wildlife-and-climate-change-series

**Advani N. K., 2016:** WWF Wildlife and Climate Change Series: Polar bear. – World Wildlife Fund, Washington, DC, available at https://www.worldwildlife.org/publications/polar-bear-wwf-wildlife-and-climate-change-series

**Ananicheva M., Karpachevsky A., 2015:** Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st century // Environmental Earth Sciences, v. 74, № 3, pp. 1985-1995.

**Ananicheva M., Kononov Yu., Belozerov E., 2020:** Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // Bulletin of geography (Physical Geography Series) Nicolaus Copernicus University (NCU), Torun, v. 19, pp. 5-18, doi:10.2478/bgeo-2020-0006.

**Anderegg W. R. L., Trugman A. T., Badgley G., Anderson C. M., Bartuska A., Ciais P., Cullenward D., Field C. B., Freeman J., Goetz S. J., Hicke J. A., Huntzinger D., Jackson R. B., Nickerson J., Pacala S., Randerson J. T., 2020:** Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests // Science, v. 368, № 6497, eaaz7005, doi:10.1126/science.aaz7005.

**Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y., 2017:** Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment // Geographical Review, v. 107, № 1, pp. 108-124, doi:10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x.

**Arneth A., Makkone R., Olin S., Paasonen P., Holst T., Kajos M. K., Kulmala M., Maximov T., Miller P. A., Schurgers, G., 2016:** Future vegetation-climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of $CO_2$ and secondary organic aerosols // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 16, pp. 5243-5262.

**Barrett K., Baxter R., Kukavskaya E., Balzter H., Shvetsov E., Buryak L., 2020:** Postfire recruitment failure in Scots pine forests of southern Siberia // Remote Sensing of Environment, v. 237, 111539.

**Beever E. A., O'Leary J., Mengelt C., West J. M., Julius S., Green N., Magness D., Petes L., Stein B., Nicotra A. B., Hellmann J. J., Robertson A. L., Staudinger M. D., Rosenberg A. A., Babij E., Brennan J., Schuurman G. W., Hofmann G. E., 2016:** Improving conservation outcomes with a new paradigm for understanding species' fundamental and realized adaptive capacity // Conservation Letters, v. 9, № 2, pp. 131-137.

**Berner L. T., Beck P. S., Bunn A. G., Goetz S. J., 2013:** Plant response to climate change along the forest-tundra

ecotone in northeastern Siberia // Global Change Biology, vol. 19, no. 11, pp. 3449-3462, doi:10.1111/gcb.12304.

**Bezmaternykh D. M., 2016:** Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia // Russian Journal of Ecology, v. 47, № 5, pp. 480-485.

**Biskaborn B. K., Matthes H., Boike J., Cable W. L., Diekmann B., Grosse G., Lantuit H., Smith S. L., Noetzli J., Phillips M., Vieira G., Streletskiy D. A., Schoeneich P., Romanovsky V. E., Kholodov A., Yoshikawa K., Lewkowicz A. G., Abramov A., Allard M., Christiansen H. H., Delaloye R., Drozdov D., Malkova G., Moskalenko N., Vasiliev A., Etzelmüller B., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Lanckman J. P., Kaverin D., Konstantinov P., Skryabin P., Zheleznyak M., Kröger T., Lambiel C., Luo D., Wu Q., Meiklejohn I., Oliva M., Ramos M., Sannel A. B. K., Sergeev D., Seybold C., 2019:** Permafrost is warming at a global scale // Nature communications, v. 10, № 1, pp. 1-11.

**Brown K. P., Gerber A., Bedulina D., Timofeyev M. A., 2021:** Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, vol. 8, no. 4, e1528.

**Brazhnik K., Hanley C., Shugart H. H., 2017:** Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia // Forests, v. 8, № 2, 49 p., doi:10.3390/f8020049.

**Brazhnik K., Shugart H. H., 2015:** 3D simulation of boreal forests: structure and dynamics in complex terrain and in a changing climate // Environmental Research Letters, v. 10, № 10, 105006, doi:10.1088/1748-9326/10/10/105006.

**Buma B., 2015:** Disturbance interactions: characterization, prediction, and the potential for cascading effects // Ecosphere, v. 6, № 4, pp. 1-15, doi:10.1890/ES15-00058.1.

**Chen Y., Romps D. M., Seeley J. T., Veraverbeke S., Riley W. J., Mekonnen Z. A., Randerson J. T., 2021:** Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon // Nature Climate Change, v. 11, № 5, pp. 404-410.

**Chernogaeva G. M., Kuznetsova V. V., Kukhta A. E., 2020:** Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region // Russian Meteorology and Hydrology, v. 45, № 12, pp. 851-857, doi:10.3103/S1068373920120055.

**Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I. Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T., 2020:** Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review, v. 148, № 8, pp. 3081-3110, doi:10.1175/MWR-D-19-0251.1.

**Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu., 2021:** Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research, v. 267, 1 April 2022, 105928 doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928Get rights and content

**Decourtye A., Alaux C., Le Conte Y., Henry M., 2019:** Toward the protection of bees and pollination under global change: present and future perspectives in a challenging applied science // Current opinion in insect science, v. 35, pp. 123-131.

**Delgado M. D. M., Roslin T., Tikhonov G., Meyke E., Lo C., Gurarie E., Abadonova M., Abduraimov O., Adrianova O., Akimova T., Akkiev M., Ananin A., Andreeva E., Andriychuk N., Antipin M., Arzamascev K., Babina S., Babushkin M., Bakin O., Barabancova A., Basilskaja I., Belova N., Belyaeva N., Bespalova T., Bisikalova E., Bobretsov A., Bobrov V., Bobrovskyi V., Bochkareva E., Bogdanov G., Bolshakov V., Bondarchuk S., Bukharova E., Butunina A., Buyvolov Y., Buyvolova A., Bykov Y., Chakhireva E., Chashchina O., Cherenkova N., Chistjakov S., Chuhontseva S., Davydov E. A., Demchenko V., Diadicheva E., Dobrolyubov A., Dostoyevskaya L., Drovnina S., Drozdova Z., Dubanaev A., Dubrovsky Y., Elsukov S., Epova L., Ermakova O. S., Ermakova O., Esengeldenova A., Evstigneev O., Fedchenko I., Fedotova V., Filatova T., Gashev S., Gavrilov A., Gaydysh I., Golovcov D., Goncharova N., Gorbunova E., Gordeeva T., Grishchenko V., Gromyko L., Hohryakov V., Hritankov A., Ignatenko E., Igosheva S., Ivanova U., Ivanova N., Kalinkin Y., Kaygorodova E., Kazansky F., Kiseleva D., Knorre A., Kolpashikov L., Korobov E., Korolyova H., Korotkikh N., Kosenkov G., Kossenko S., Kotlugalyamova E., Kozlovsky E., Kozsheechkin V., Kozurak A., Kozyr I., Krasnopevtseva A., Kruglikov S., Kuberskaya O., Kudryavtsev A., Kulebyakina E., Kulsha Y., Kupriyanova M., Kurbanbagamaev M., Kutenkov A., Kutenkova N., Kuyantseva N., Kuznetsov**

**A., Larin E., Lebedev P., Litvinov K., Luzhkova N., Mahmudov A., Makovkina L., Mamontov V., Mayorova S., Megalinskaja I., Meydus A., Minin A., Mitrofanov O., Motruk M., Myslenkov A., Nasonova N., Nemtseva N., Nesterova I., Nezdoliy T., Niroda T., Novikova T., Panicheva D., Pavlov A., Pavlova K., Van P., Podolski S., Polikarpova N., Polyanskaya T., Pospelov I., Pospelova E., Prokhorov I., Prokosheva I., Puchnina L., Putrashyk I., Raiskaya J., Rozhkov Y., Rozhkova O., Rudenko M., Rybnikova I., Rykova S., Sahnevich M., Samoylov A., Sanko V., Sapelnikova I., Sazonov S., Selyunina Z., Shalaeva K., Shashkov M., Shcherbakov A., Shevchyk V., Shubin S., Shujskaja E., Sibgatullin R., Sikkila N., Sitnikova E., Sivkov A., Skok N., Skorokhodova S., Smirnova E., Sokolova G., Sopin V., Spasovski Y., Stepanov S., Stratiy V., Strekalovskaya V., Sukhov A., Suleymanova G., Sultangareeva L., Teleganova V., Teplov V., Teplova V., Tertitsa T., Timoshkin V., Tirski D., Tolmachev A., Tomilin A., Tselishcheva L., Turgunov M., Tyukh Y., Van V., Ershkova E., Vasin A., Vasina A., Vekliuk A., Vetchinnikova L., Vinogradov V., Volodchenkov N., Voloshina I., Xoliqov T., Yablonovska-Grishchenko E., Yakovlev V., Yakovleva M., Yantser O., Yarema Y., Zahvatov A., Zakharov V., Zelenetskiy N., Zheltukhin A., Zubina T., Kurhinen J., Ovaskainen O., 2020:** Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events // Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, № 49, pp. 31249-31258, doi:10.1073/PNAS.2002713117.

**Delgerjargal U., Gehlbach S., Potapov P. V., Munteanu C., Bragina E. V., Radeloff V. C., 2020:** Correlates of forest-cover change in European Russia, 1989-2012 // Land Use Policy, v. 96, 104648, doi:10.1016/j.landusepol.2020.104648.

**Derocher A. E., Lunn N. J., Stirling I., 2004:** Polar bears in a warming climate // Integrative and Comparative Biology, № 44, pp. 163-176.

**Dulamsuren Ch., Wommelsdorf T., Zhao F., Xue Y., Zhumadilov B. Z., Leuschner C., Hauck M., 2013:** Increased summer temperatures reduce the growth and regeneration of Larix sibirica in southern boreal forests of eastern Kazakhstan // Ecosystems, v. 16, № 8, pp. 1536-1549, doi:10.1007/s10021-013-9700-1.

**Eliseev A. V., Mokhov I. I., Chernokulsky A. V., 2014:** An ensemble approach to simulate $CO_2$ emissions from natural fires // Biogeosciences, v. 11, № 12, pp. 3205-3223, doi:10.5194/bg-11-3205-2014.

**Faridah-Hanum I., Rawat G. S., Yahara T., Abi-Said M., Corlett R. T., Courchamp F., Dai R., Freitag H., Haryoko T., Hewitt C. L., Hussain T., Kadoya T., Maheswaran G., Miyashita T., Mohan Kumar B., Mohapatra A., Nakashizuka T., Piggott J. J., Raghunathan C., Rawal R., Sheppard A., Shirayama Y., Son Y., Takamura N., Thwin S., Yamakita T., Febria C. M., Niamir A., 2018:** Status, trends and future dynamics of biodiversity and ecosystems underpinning nature's contributions to people. Chapter 3 in: The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Asia and the Pacific / Karki M., Senaratna Sellamuttu S., Okayasu S., Suzuki W. (eds.) / Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – Bonn, pp.175-264.

**Fedorov N. I., Martynenko V. B., Zhigunova S. N., Mikhailenko O. I., Shendel' G. V., Naumova L. G., 2021:** Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s // Russian Journal of Ecology, v. 52, pp. 118-125, doi:10.1134/S1067413621020053.

**Fomin V. V., Mikhailovich A. P., Shiyatov S. G., 2020:** Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals: Centuries-Old Change and Spatial Patterns // Mountain Research and Development, v. 40, № 2, pp. 32-40, doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00002.1.

**Forzieri G., Girardello M., Ceccherini G., Spinoni J., Feyen L., Hartmann H., Beck P. S. A., Camps-Valls G., Chirici G., Mauri A., Cescatti A., 2021:** Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests // Nature Communications, 12, p. 1081, doi: 10.1038/s41467-021-21399-7.

**Gaisin I. K., Moiseev P., Makhmutova I. I., Nizametdinov N. F., Moiseeva O. O., 2020:** Expansion of Tree Vegetation in the Forest-Mountain Steppe Ecotone on the Southern Urals in Relation to Changes in Climate and Habitat Moisture // Russian Journal of Ecology, v. 51, № 4, pp. 306-318, doi:10.1134/S1067413620040074.

**Gatti R. C., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A., Fabbio L., Battipaglia G., Liang J., 2019:** Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last-century climate change // Scientific Reports, v. 9, № 1, 7678, doi:10.1038/s41598-019-44188-1.

**Global Peatland Database/Greifswald Mire Centre, 2020:** Available at https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html

**Glushenkov O. V., 2017:** The extending of ranges of some bird species at the North-Eastern border of their distribution due to intra-century climate changes // Nature Conservation Research, v. 2, No. 3, pp. 23-39, doi:10.24189/ncr.2017.047.

**Greenpeace, 2019:** Сколько животных могло пострадать от лесных пожаров в Сибири? https://greenpeace.ru/blogs/2019/08/07/v-greenpeace-podschitali-skolko-zhivotnyh-moglo-postradat-ot-lesnyh-pozharov-v-sibiri/

**Grigor'ev A. A., Devi N. M., Kukarskikh V. V., V'yukhina S. O., Galimova A. A., Moiseev P. A., Fomin V. V., 2019:** Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau // Russian Journal of Ecology, v. 50, № 4, pp. 311-322, doi:10.1134/S1067413619040076.

**Hampton S. E., McGowan S., Ozersky T., Virdis S. G., Vu T. T., Spanbauer T. L., Spanbauer T. L., Kraemer B. M., Mackay A. W., Powers S. M., Meyer M. F., Dicarlo M., O'reilly C. M., Galloway A. W. E., Fritz S. C., 2018:** Recent ecological change in ancient lakes // Limnology and Oceanography, v. 63, № . 5, pp. 2277-2304.

**Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J., 2021:** A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. Journal of Mountain Science, v. 18, No. 2, pp. 291-306, doi:10.1007/s11629-020-6221-1.

**Harris N. L., Gibbs D. A., Baccini A., Birdsey R., de Bruin S., Farina M., Fatoyinbo L., Hansen M. C., Herold M., Houghton R. A., Potapov P. V., Suarez D. R., Roman-Cuesta R. M., Saatchi S. S., Slay C. M., Turubanova S., Tyukavina A., 2021:** Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // Nature Climate Change, v. 11, pp. 234-240.

**Hilty J. A., Keeley A. T., Merenlender A. M., Lidicker Jr W. Z., 2019:** Corridor ecology: linking landscapes for biodiversity conservation and climate adaptation – Island Press, 351 p.

**Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G., 2018:** Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes // International Journal of Wildland Fire, v. 27, No. 5, pp. 293-312, doi:10.1071/WF17084.

**IPBES, 2016:** The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production / S. G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, and H. T. Ngo (eds) / Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. – Bonn, Germany, 552 p.

**IPCC, 2019:** Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / Shukla P. R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H. O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., Van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.), 896 p.

**IUCN, 2012:** IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Second edition, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, IUCN, 32 p.

**IUCN Standards and Petitions Committee, 2019:** Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 14, available at http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf.

**Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L., 2019:** Land–climate interactions, in: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, Shukla P. R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H. O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., Van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.) / IPCC, pp. 131-248.

**Karthe D., Chalov S., Moreydo V., Efimov V., Romanchenko A., Batbayar G., Kalugin A., Westphal K., 2017:** Assessment of Runoff, Water and Sediment Quality in the Selenga River Basin Aided by a Web-Based Geoservice // Water Resources, v. 44, № 3, pp. 399-416.

**Kautz M., Meddens A. J. H., Hall R. J., Arneth A., 2017:** Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests – a synthesis of recent data, uncertainties and implications for forest monitoring and modelling // Global Ecology and Biogeography, v. 26, № 5, pp. 533-552, doi:10.1111/geb.12558.

**Khakimulina T., Fraver S., Drobyshev I., 2016:** Mixed-severity natural disturbance regime dominates in an old-growth Norway spruce forest of northwest Russia // Journal of Vegetation Science, v. 27, № 2, pp. 400-413.

**Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Ranson K. J., Petrov I. A., 2017:** Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // Journal of Mountain Science, v. 14, № 3, pp. 442-452, doi:10.1007/s11629-016-4286-7.

**Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L, Shushpanov A. S., Golyukov A. S., 2021a:** Climate-driven conifer mortality in Siberia // Global Ecology and Biogeography, v. 30, № 2, pp. 543-556, doi:10.1111/geb.13243.

**Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D., 2021b:** Wildfires in the Siberian taiga. Ambio, v. 50, No. 11, pp. 1953-1974, doi:10.1007/s13280-020-01490-x.

**Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V., 2019:** Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environmental Change, v. 19, № . 5, pp. 1229-1247.

**Kirdyanov A. V., Knorre A. A., Fedotova E. V., Naurzbaev M. M., Hagedorn F., Rigling A., Vaganov E. A., Moiseev P. A., 2012:** 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia // Boreas, v. 41, № 1, pp. 56-67, doi:10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x.

**Kloster S., Lasslop G., 2017:** Historical and future fire occurrence (1850 to 2100) simulated in CMIP5 Earth System Models // Global and Planetary Change, v. 150, pp. 58-69, doi:10.1016/j.gloplacha.2016.12.017.

**Knorr W., Arneth A., Jiang L., 2016:** Demographic controls of future global fire risk // Nature Climate Change, v. 6, № 8, pp. 781-785, doi:10.1038/nclimate2999.

**Kondakova O. V., Savkin V. M., Dvurechenskaya S. Ya., Marusin K. V., 2020:** Water balance and patterns of mineralization of closed Lake Chany // Geography and Natural Resources, v. 41, № 1, pp. 51-58.

**Körner C., 2020:** Climatic Controls of the Global High Elevation Treelines. / In: Encyclopedia of the World's Biomes, Goldstein M.I, DellaSala D.A. (eds.) – Elsevier, USA, pp. 275-281.

**Krause A., Kloster S., Wilkenskjeld S., Paeth H., 2014:** The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 119, № 3, pp. 312-322, doi:10.1002/2013JG002502.

**Li D., Wu S., Liu L., Zhang Y., Li S., 2018:** Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change // Global Change Biology, v. 24, № 9, pp. 4095-4106, doi:10.1111/gcb.14327.

**Liljedahl A. K., Boike J., Daanen R. P., Fedorov A. N., Frost G. V., Grosse G., Hinzman L. D., Iijma Y., Jorgenson J. C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M. K., Romanovsky V. E., Schulla J., Tape K. D., Walker D. A., Wilson C. J., Yabuki H., Zona D., 2016:** Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature Geoscience, v. 9, № 4, pp. 312-318.

**Lipka O., Kanzai V., 2020:** Adaptation Approaches for Conservation in Protected Areas' Management: Altai-Sayan Ecoregion (Russia) – Handbook of Climate Change Management: Research, Leadership, Transformation, pp. 1-29.

**Marchal J., Cumming S. G., McIntire E. J. B., 2020:** Turning Down the Heat: Vegetation Feedbacks Limit Fire Regime Responses to Global Warming // Ecosystems, v. 23, № 1, pp. 204-216, doi:10.1007/s10021-019-00398-2.

**Marshman J., Blay-Palmer A., Landman K., 2019:** Anthropocene Crisis: Climate Change, Pollinators, and Food Security // Environments, v. 6, № 2, 16 p.

**Mathisen I. E., Mikheeva A., Tutubalina O. V., Aune S., Hofgaard A., 2014:** Fifty years of tree line change in the Khibiny Mountains, Russia: Advantages of combined remote sensing and dendroecological approaches // Applied Vegetation Science, v. 17, № 1, pp. 6-16, doi:10.1111/avsc.12038.

**Matskovsky V., Dolgova E., Morozova P., Semenyak N., Solomina O., 2020a:** Radial growth projections for spruce on Solovetskiye Islands, the White Sea, for the 21st century / In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing, v. 438, № 1, 012017.

**Matskovsky V., Kuznetsova V., Morozova P., Semenyak N., Solomina O., 20206:** Estimated influence of extreme climate events in the 21st century on the radial growth of pine trees in Povolzhie region (European Russia) / In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing, v. 611, № 1, 012047.

**Mawdsley J. R., O'Malley R., Ojima D. S., 2009:** A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation // Conservation Biology, v. 23, № 5, pp. 1080-1089.

**McVittie A., Cole L. J., Wreford A., Sgobbi A., Yordi B., 2018:** Ecosystem-based solutions for disaster risk reduction: Lessons from European applications of ecosystem-based adaptation measures // International journal of disaster risk reduction, v. 32, pp. 42-54.

**Millar C. I., Stephenson N. L., 2015:** Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // Science, v. 349, № 6250, pp. 823-826.

**Mitchell S. J., 2013:** Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis/. // International Journal of Forest Research, v. 86, № 2, pp. 147-157.

**Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L., 2021:** Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // Science of The Total Environment, v. 785, 147314.

**Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C., Beck P. S., Wilmking M., Hallinger M., Blok D., Tape K. D., Rayback S. A., Macias Fauria M., Forbes B. C., Speed J. D., Boulanger-Lapointe N., Rixen C., Lévesque E., Schmidt N. M., Baittinger C., Trant A. J., Hermanutz L., Collier L. S., Dawes M. A., Lantz T. C., Weijers S., Jørgensen R. H., Buchwal A., Buras A., Naito A. T., Ravolainen V. T., Schaepman Strub G., Wheeler J. A., Wipf S., Guay K. C., Hik D. S., Vellend M., 2015:** Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome // Nature Climate Change, v. 5, № 9, pp. 887-891, doi:10.1038/nclimate2697.

**Olchev A. V., Rozinkina I. A., Kuzmina E. V., Nikitin M. A., Rivin G. S., 2018:** Influence of forest cover changes on regional weather conditions: estimations using the mesoscale model COSMO / In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing, v. 107, № 1, 012105.

**Parfenova E., Tchebakova N., Soja A., 2019:** Assessing landscape potential for human sustainability and 'attractiveness' across Asian Russia in a warmer 21st century // Environmental Research Letters, v. 14, № 6, 065004.

**Peng X., Zhang T., Frauenfeld O. W., Wang S., Qiao L., Du R., Mu C., 2020:** Northern hemisphere greening in association with warming permafrost // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 125, No. 1, e2019JG005086, doi:10.1029/2019JG005086.

**Pospelova E. B., Pospelov I. N., Orlov M. V., 2017:** Climate change in Eastern Taimyr over the last 80 years and the warming impact on biodiversity and ecosystem processes in its territory // Nature Conservation Research, v. 2, № 3, pp. 48-60.

**Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C., 2015:** Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment, v. 159, pp. 28-43, doi:10.1016/j.rse.2014.11.027.

**Potemkina T. G., Potemkin V. L., Kotsar O. V., Fedotov A. P., 2018:** Climate factors as a possible trigger of modern ecological changes in shallow zone of Lake Baikal (Russia) // International Journal of Environmental Studies, v. 75, № 1, pp. 86-98.

**Prăvălie R., 2018:** Major perturbations in the Earth's forest ecosystems. Possible implications for global warming // Earth-Science Reviews, v. 185, pp. 544-571.

**Prăvălie R., Nita I. A., Patriche C., Niculiță M., Birsan M. V., Roșca B., Bandoc G., 2021:** Global changes in soil organic carbon and implications for land degradation neutrality and climate stability // Environmental Research, v. 201, 111580.

**Rees W. G, Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D. M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O., 2020:** Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? // Global Change Biology, v. 26, № 7, pp. 3965-3977, doi:10.1111/gcb.15113.

**Reside A. E., Butt N., Adams V. M., 2018:** Adapting systematic conservation planning for climate change // Biodiversity and Conservation, v. 27, № 1, pp. 1-29.

**Rets E., Durmanov I., Kireeva M., Smirnov A., Popovnin V., 2020:** Past 'peak water' in the North Caucasus: deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // Climatic Change, v. 163, pp. 2135-2151.

**Roslin T., Antao L., Hallfors M., Meyke E., Lo C., Tikhonov G., Delgado M. D. M., Gurarie E., Abadonova M., Abduraimov O., Adrianova O., Akimova T., Akkiev M., Ananin A., Andreeva E., Andriychuk N., Antipin M., Arzamascev K., Babina S., Babushkin M., Bakin O., Barabancova A., Basilskaja I., Belova N., Belyaeva N., Bespalova T., Bisikalova E., Bobretsov A., Bobrov V., Bobrovskyi V., Bochkareva E., Bogdanov G., Bolshakov V., Bondarchuk S., Bukharova E., Butunina**

**A., Buyvolov Y., Buyvolova A., Bykov Y., Chakhireva E., Chashchina O., Cherenkova N., Chistjakov S., Chuhontseva S., Davydov E. A., Demchenko V., Diadicheva E., Dobrolyubov A., Dostoyevskaya L., Drovnina S., Drozdova Z., Dubanaev A., Dubrovsky Y., Elsukov S., Epova L., Ermakova O., Ermakova O. S., Ershkova E., Esengeldenova A., Evstigneev O., Fedchenko I., Fedotova V., Filatova T., Gashev S., Gavrilov A., Gaydysh I., Golovcov D., Goncharova N., Gorbunova E., Gordeeva T., Grishchenko V., Gromyko L., Hohryakov V., Hritankov A., Ignatenko E., Igosheva S., Ivanova U., Ivanova N., Kalinkin Y., Kaygorodova E., Kazansky F., Kiseleva D., Knorre A., Kolpashikov L., Korobov E., Korolyova H., Korotkikh N., Kosenkov G., Kossenko S., Kotlugalyamova E., Kozlovsky E., Kozsheechkin V., Kozurak A., Kozyr I., Krasnopevtseva A., Kruglikov S., Kuberskaya O., Kudryavtsev A., Kulebyakina E., Kulsha Y., Kupriyanova M., Kurbanbagamaev M., Kutenkov A., Kutenkova N., Kuyantseva N., Kuznetsov A., Larin E., Lebedev P., Litvinov K., Luzhkova N., Mahmudov A., Makovkina L., Mamontov V., Mayorova S., Megalinskaja I., Meydus A., Minin A., Mitrofanov O., Motruk M., Myslenkov A., Nasonova N., Nemtseva N., Nesterova I., Nezdoliy T., Niroda T., Novikova T., Panicheva D., Pavlov A., Pavlova K., Podolski S., Polikarpova N., Polyanskaya T., Pospelov I., Pospelova E., Prokhorov I., Prokosheva I., Puchnina L., Putrashyk I., Raiskaya J., Rozhkov Y., Rozhkova O., Rudenko M., Rybnikova I., Rykova S., Sahnevich M., Samoylov A., Sanko V., Sapelnikova I., Sazonov S., Selyunina Z., Shalaeva K., Shashkov M., Shcherbakov A., Shevchyk V., Shubin S., Shujskaja E., Sibgatullin R., Sikkila N., Sitnikova E., Sivkov A., Skok N., Skorokhodova S., Smirnova E., Sokolova G., Sopin V., Spasovski Y., Stepanov S., Stratiy V., Strekalovskaya V., Sukhov A., Suleymanova G., Sultangareeva L., Teleganova V., Teplov V., Teplova V., Tertitsa T., Timoshkin V., Tirski D., Tolmachev A., Tomilin A., Tselishcheva L., Turgunov M., Tyukh Y., Polina V., Vladimir V., Vasin A., Vasina A., Vekliuk A., Vetchinnikova L., Vinogradov V., Volodchenkov N., Voloshina I., Xoliqov T., Yablonovska-Grishchenko E., Yakovlev V., Yakovleva M., Yantser O., Yarema Y., Zahvatov A., Zakharov V., Zelenetskiy N., Zheltukhin A., Zubina T., Kurhinen J., Ovaskainen O., 2021:** Phenological shifts of abiotic events, producers and consumers across a continent // Nature Climate Change, v. 11, № 3, pp. 241-248, doi:10.1038/s41558-020-00967-7.

**Sannikov S. N., Tantsyrev N. V., Petrova I. V., 2018:** Invasion of Siberian Pine populations in mountain tundra in the Northern Urals // Contemporary Problems of Ecology, v. 11, 4 4, pp. 396-405, doi:10.1134/s1995425518040078.

**Schaphoff S., Reyer C. P. O., Gerten D., Schepaschenko D., Shvidenko A., 2016:** Tamm review: observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // Forest Ecology and Management, v. 361, pp. 432-444, doi:10.1016/j.foreco.2015.11.043.

**Schickhoff U., Bobrowski M., Böhner J., Bürzle B., Chaudhary R. P., Gerlitz L., Heyken H., Lange J., Müller M., Scholten T., Schwab N., Wedegärtner R., 2015:** Do Himalayan treelines respond to recent climate change? An evaluation of sensitivity indicators // Earth System Dynamics, v. 6, № 1, pp. 245-265, doi:10.5194/esd-6-245-2015.

**Schmitz O. J., Lawler J. J., Beier P., Groves C., Knight G., Boyce D. A., Bulluck J., Johnston K. M., Klein M. L., Muller K., Pierce D. J.; Singleton W. R., Strittholt J. R., Theobald D. M., Trombulak S. C., Trainor A., 2015:** Conserving biodiversity: practical guidance about climate change adaptation approaches in support of land-use planning // Natural Areas Journal, v. 35, № 1, pp. 190-203.

**Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M. J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T. A., Reyer C. P. O., 2017:** Forest disturbances under climate change // Nature Climate Change, v. 7, № 6, pp. 395-402, doi:10.1038/nclimate3303.

**Senf C., Buras A., Zang C. S., Rammig A., Seidl R., 2020:** Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe // Nature Communications, v. 11, № 1, 6200, doi:10.1038/s41467-020-19924-1.

**Senf C., Pflugmacher D., Zhiqiang Y., Sebald J., Knorn J., Neumann M., Hostert P., Seidl R., 2018:** Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades // Nature Communications, v. 9, № 1, 4978, doi:10.1038/s41467-018-07539-6.

**Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P. V., Santoro M., See L. M., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A. A., Korotkov V. N., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F., 2021:** Russian forest

sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports, v. 11, № 1, e12825.

**Shikhov A. N., Perminova E. S., Perminov S. I., 2019:** Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire- and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia // Natural Hazards, v. 97, № 6, pp. 283-308, doi:10.1007/s11069-019-03642-z.

**Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Semakina A. V., 2020:** A satellite-derived database for standreplacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986-2017 // Earth System Science Data, v. 12, № 4, pp. 3489-3513.

**Shuman J. K., Shugart H. H., Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J., Ershov D., Holcomb K., 2015:** Forest forecasting with vegetation models across Russia // Canadian Journal of Forest Research, v. 45, № 2, pp. 175-184, doi:10.1139/cjfr-2014-0138.

**Sirin A. A., Medvedeva M. A., Makarov D. A., Maslov A. A., Joosten H., 2020:** Multispectral satellite-based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow Region (Russia) // Ecological Engineering, v. 158, 106044, doi:10.1016/j.ecoleng.2020.106044.

**Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A., 2018:** Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data // Land, v. 7, № 71, pp. 1-22, doi:10.3390/ land7020071.

**Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T., Kuznetsov O., Smagin V., Fedotov Y. U., 2017:** Russian Federation (European Part). In: Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation / Joosten H., Tanneberger F., Moen A. (eds.) / Schweizerbart Science Publishers – Stuttgart, pp. 589-616, doi:10.1127/mireseurope/2017/0001-0049.

**Sitch S., Friedlingstein P., Gruber N., Jones S. D., Murray-Tortarolo G., Ahlström A., Doney S. C., Graven H., Heinze C., Huntingford C., Levis S., Levy P. E., Lomas M., Poulter B., Viovy N., Zaehle S., Zeng N., Arneth A., Bonan G., Bopp L., Canadell J. G., Chevallier F., Ciais P., Ellis R., Gloor M., Peylin, P. Piao S. L., Le Quéré C., Smith B., Zhu Z., Myneni R., 2015:** Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide // Biogeosciences, v. 12, № 3, pp. 653-679.

**Son R., Kim H., Wang S., Jeong J., Woo S., Jeong J., Lee B. D., Kim S. H., LaPlante M., Kwon C. G., Yoon J., 2021:** Changes in fire weather climatology under 1.5 °C and 2.0 °C warming // Environmental Research Letters, v. 16, № 3, 034058.

**Spathelf P., Stanturf J., Kleine M., Jandl R., Chiatante D., Bolte A., 2018:** Adaptive measures: Integrating adaptive forest management and forest landscape restoration // Annals of Forest Science, v. 75, № 2, pp. 1-6.

**Stirling I., Derocher A. E., 2012:** Effects of climate warming on polar bears: a review of the evidence // Global Change Biology, v. 18, pp. 2694-2706.

**Stirling I., Parkinson C. L., 2006:** Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (Ursus maritimus) in the Canadian Arctic // Arctic, v. 59, № 3, pp. 261-275.

**Turetsky M. R., Benscoter B., Page S., Rein G., Van Der Werf G. R., Watts A., 2015:** Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // Nature Geoscience, v. 8, № 1, pp. 11-14.

**Ukkola A. M., De Kauwe M. G., Roderick M. L., Abramowitz G., Pitman A. J., 2020:** Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation // Geophysical Research Letters, v. 46, № 11, e2020GL087820.

**Visconti P., Elias V., Sousa Pinto I., Fischer M., Ali-Zade V., Báldi A., Brucet S., Bukvareva E., Byrne K., Caplat P., Feest A., Guerra C., Gozlan R., Jelić D., Kikvidze Z., Lavrillier A., Le Roux X., Lipka O., Petrík P., Schatz B., Smelansky I., Viard F., 2018:** Status, trends and future dynamics of biodiversity and ecosystems underpinning nature's contributions to people. Chapter 3 in: The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia / Rounsevell M., Fischer M., Torre-Marin Rando A., Mader A. (eds.) / Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – Bonn, pp.187-382.

**Wang H., Jiang F., Wang J., Ju W., Chen J. M., 2019:** Terrestrial ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2 XCO2 retrievals // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 19, № 18, pp. 12067-12082.

**Watson J. E. M., Rao M., Ai-Li K., Xie Y., 2012:** Climate change adaptation planning for biodiversity conservation: a review // Advances in Climate Change Research, v. 3, № 1, pp. 1-11.

**Wiig O., Amstrup S., Atwood T., Laidre K., Lunn N., Obbard M., Regehr E., Thiemann G., 2015:** Ursus maritimus / The

IUCN Red List of Treatened Species 2015 http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-4.RLTS.T22823A14871490.en.

**Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S., 2020:** Global lake responses to climate change // Nature Reviews Earth and Environment, v. 1, № 8, pp. 388-403.

**Zolotareva N. V., Zolotarev M. P., 2017:** The phenomenon of forest invasion to steppe areas in the Middle Urals and its probable causes // Russian Journal of Ecology, v. 48, № 1, pp. 21-31, doi:10.1134/s106741361606014x.

### 2.1.2 Углеродный баланс почв

***О. Н. Липка, В. Ю. Вертянкина, М. Д. Корзухин, И. Н. Курганова, В. С. Столбовой, С. С. Чернянский***

Россия обладает крупнейшими в мире запасами почвенного углерода в верхнем 30-сантиметровом слое – 148-167 Гт С, что составляет более 20% мировых (FAO, 2017; Национальный доклад, 2018). Распределение по слоям и регионам в зависимости от методики оценки были подробно охарактеризованы во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) и рассматриваются в разделе 3.1 настоящего доклада.

#### 2.1.2.1 Оценка дыхания почв России

От года к году дыхание для одних и тех же почв может меняться более чем на 30% (например, литоземы: 0,23-0,31 г С/м$^2$/сут). Мониторинг эмиссии $CO_2$ из дерново-подзолистой почвы (1998-2018 гг.) подтверждает высокую временную изменчивость месячных и сезонных потоков $CO_2$ из почв, а также наличие статистически достоверных линейных трендов снижения годовых и осенних потоков на фоне усиления аридизации климата (Курганова и др., 2020). Изменение дыхания на небольших расстояниях может превышать 400% (например, у глееземов – 0,37 г С/м$^2$/сут, а у торфяных почв – 1,43 г С/м$^2$/сут) (Stolbovoi, 2003). Наблюдается тесная связь между суммарными летними и годовыми потоками $CO_2$ и величиной летнего гидротермического коэффициента, объясняющая 51–58% их межгодовой вариабельности. Отмечается относительное уменьшение эмиссионной составляющей углеродного цикла в ответ на экстремальные засухи, составляющее 24-29% для годовых и 44-47% для летних потоков $CO_2$ из почв (Курганова и др., 2016). Для обеспечения сопоставимости информации о дыхании почв данные в унифицированном формате с картографической привязкой заносятся в Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (ЕГРПР, 2014).

Средние показатели гетеротрофного дыхания почв по природным зонам и категориям земель были приведены во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). Обновленные данные средних значений для России (264-318 г С/м$^2$ в год) близки к представленным ранее (Кудеяров, 2018). В современном распределении величины гетеротрофного дыхания почв на территории России проявляются не только значительные широтные, но и региональные различия между ЕТР и АТР (Mukhortova et al., 2021; Naidu, Bagchi, 2021).

В настоящее время гетеротрофное дыхание почв для территории России для периода 2000-2010 гг. оценивается в 3,2 Гт С/год или 190 г С/м$^2$/год, что на 9-20% выше, чем большинство ранее полученных величин (Mukhortova et al., 2021), и несколько меньше, чем значения, представленные во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014): 3,4 Гт С/год или 220 г С/м$^2$/год. Согласно прогнозам, гетеротрофное дыхание почвы может к 2050 г. увеличиться в среднем на 10-12% и достичь 3,5 Гт С/год (Mukhortova et al., 2021).

Учитывая высокую межгодовую изменчивость месячных и сезонных величин дыхания почв, весьма актуально сохранение существующих рядов наблюдений и расширение сети наблюдений. Способствовать решению данной задачи будет сеть карбоновых полигонов, представляющих собой территории для исследования биогеохимиче-

ского цикла углерода наиболее типичных экосистем и выработки практических мер по контролю эмиссии и поглощения климатических активных газов (Иванов и др., 2021).

### 2.1.2.2 Баланс углерода почв различных экосистем России

В малонарушенных естественных экосистемах запасы углерода в почвах со временем изменяются незначительно, т.е. углеродный баланс почв находится в квазиравновесном состоянии. Смена режима землепользования оказывает существенное влияние на углеродный баланс почв (Курганова и др., 2019; Rolinski et al., 2021). Общий баланс углерода в почвах России оценивается как положительный и составляет около 76±32 млн т С (табл. 2.1.2.1). Количество эквивалентно поглощению из атмосферы приблизительно 280 млн т C-$CO_2$/год, или почти 19% годовых выбросов парниковых газов развитыми странами (Национальный доклад, 2018).

Как правило, сельскохозяйственная деятельность, особенно традиционная вспашка, ведут к интенсивной минерализации органического вещества почв и сопровождаются существенным сокращением запасов углерода в почвах (Lal, 2020). Сельскохозяйственное производство при традиционной системе земледелия почти всегда является чистым источником $CO_2$. Пахотные угодья России за период 1990-2016 гг. представляли собой чистый источник C-$CO_2$ в размере 21-27 (в среднем 24,5) млн т C-$CO_2$/год (Кудеяров, 2019).

***Таблица 2.1.2.1***

*Баланс углерода (млн т С) в морфогенетических горизонтах и профилях почв различных категорий земель России (адаптировано из «Национального доклада» (2018))*

| Морфогенетический горизонт/профиль | Пашня | Пастбища | Леса | Заболоченные, торфянистые угодья | Торфяные болота | Травяно-кустарниковые | Всего в зоне |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Органический (О) | 0,0 | –30,3 | –39,0 | 39,9 | –141,8 | 221,6 | 50,4 |
| Органо-аккумулятивный (А1) | 0,9 | 0,3 | 7,3 | 0,7 | 0,8 | 2,7 | 12,7 |
| Иллювиально-гумусовый (Bh) | –1,0 | –0,7 | 14,1 | 3,4 | 0,0 | –2,9 | 12,9 |
| Органо-профиль (О+А1+ h) | –0,1 | –30,7 | –17,6 | 40,0 | –141,0 | 221,4 | 76,0 |

Существует мнение, что даже наиболее перспективные методы управления почвенным углеродом во всем мире, направленные на увеличение его накопления, в совокупности вряд ли позволят сбалансировать более 5% годовых глобальных выбросов $CO_2$ в результате сжигания ископаемого топлива (Schlesinger, Amundson, 2019).

### 2.1.2.3 Последствия ожидаемых климатических изменений для баланса углерода почв России

Как отмечалось во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) и подтверждено в Национальном докладе (2018), увеличение среднегодовой температуры воздуха инициирует деградацию органического вещества в почвах и ассоциируется с отрицательным балансом углерода в почвах. Увеличение количества среднегодовых осадков стимулирует повышение запасов органического вещества и способствует положительному балансу углерода. В Национальном докладе (2018) делается вывод, что наблюдаемое изменение климата приводит к суммарно положительному балансу углерода в почвах России.

Климатические изменения влияют на приходные и расходные составляющие углеродного баланса почв, тесно связанного с потоками углерода в контактирующих с почвой средах, к которым относятся:

– поступление в почву органических остатков биоты;
– дыхание почвы, т.е. отток газообразных соединений в атмосферу;
– приток вещества из атмосферы в почву (осадки, выпадение твердых аэрозолей, поступление газообразных соединений из атмосферы в почвенный воздух);
– приток вещества в почву из литосферы (в т.ч. с газовыми эманациями, подземными водами);
– отток соединений углерода в литосферу с миграцией вещества почв (преимущественно – в твердой и жидкой фазах);
– перенос (возможен как отток, так и приток, в зависимости от принятых начальных и граничных условий) соединений углерода с почвенной массой, перемещаемой экзогенными геологическими процессами (водная эрозия, дефляция, карстово-суффозионные процессы и т.д.);
– антропогенное поступление или удаление соединений углерода (отчуждение вещества почв при их обработке и с урожаем, внесение удобрений и т.п.) (Национальный доклад, 2018).

По некоторым общим теориям (Lal, 2018), увеличение среднегодовой температуры воздуха инициирует деградацию органического вещества в почвах и стимулирует эмиссию $CO_2$, т.е. отрицательный баланс углерода в почвах. Увеличение среднего годового количества осадков способствует повышению запасов органического вещества в почвах, т.е. соответствует положительному балансу углерода в почвах. Предложенная теория используется для прогноза и моделирования влияния изменений климата на запасы углерода в почвах и изменение концентрации парниковых газов в атмосфере (Национальный доклад, 2018). Действительно, слабая корреляция концентрации содержания углерода в почвах с климатическими параметрами существует (рис. 2.1.2.1).

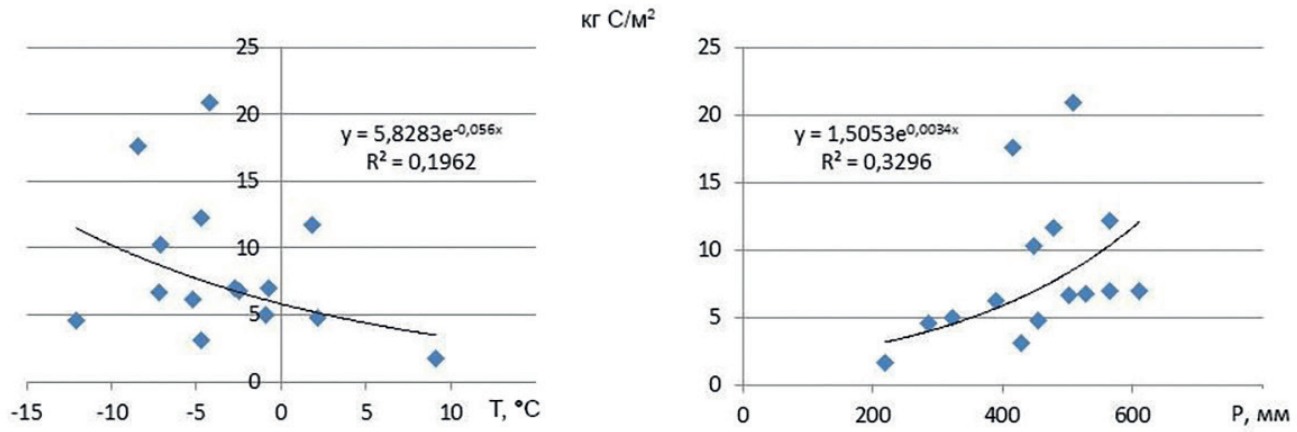



***Рис. 2.1.2.1*** *Связь концентрации углерода (кг С/м²) в слое почвы 0,3 м с температурой воздуха (Т) и количеством осадков (Р) (Национальный доклад, 2018)*

Приведенные данные (рис. 2.1.2.1) показывают, что концентрация органического углерода в почвах меньше в диапазоне более высоких температур и больше в диапазоне повышенной влажности. Температура и осадки объясняют лишь 20-30% дисперсии концентрации углерода в почвах. Почти 70-80% дисперсии связано с другими факторами, например, с количеством поступающей в почвы органики, с минеральным и гранулометрическим составом почв и др. (Национальный доклад, 2018).

В условиях России важную роль играет также распространение многолетнемерзлых пород. Их оттаивание приводит к высвобождению огромной массы влаги, которая насыщает почвы, что стимулирует образование торфа и секвестрацию углерода (Национальный доклад, 2018). В болотах создаются благоприятные условия для консервации органического углерода, обусловливаемые блокированием его микробной деструкции. Ежегодная аккумуляция углерода в торфах на всей территории России составляет около 20 млн т С (Кудеяров, 2015). В южных регионах России, где лимитирующим почвообразование фактором выступает уже не тепло-, а влагообеспеченность, на фоне сравнительной стабильности почвенного покрова прогнозируется аридизация почв с развитием сопутствующих процессов – засоления и осолонцевания (Худяков, Решоткин, 2017, 2020). На этом фоне растущая повторяемость экстремальных метеоявлений усилит процессы деградации почв, обусловленные экзогенными процессами – водной эрозией, дефляцией и др. (Национальный доклад, 2018).

В качестве одной из причин деградации почв и существенных потерь углерода называются пожары, которые приводят к дегумификации почв в результате уничтожения органогенных горизонтов (Максимова и др., 2014). В результате пожаров уменьшается содержание гидрофильных органических соединений и увеличивается содержание гидрофобных соединений (Дымов и др., 2015), происходит изменение и перераспределение пулов органического вещества между компонентами экосистемы: уменьшение запасов углерода и азота в подстилке при их возрастании в верхних минеральных горизонтах (Dymov et al., 2018). Возрастание гидрофобности почв приводит к увеличению поверхностного стока и интенсификации процессов эрозии почв (Герась-

кина и др., 2021). Например, в тундрах Хибин пирогенные потери почвенного углерода при пожаре средней интенсивности не превышают 20%, тогда как пожар высокой интенсивности приводит к потере до 75-80% почвенного углерода (Маслов и др., 2019). В условиях меняющегося климата частота и интенсивность пожаров возрастают. Пожары приводят к высвобождению соединений углерода из захороненного органического вещества почв бореальных лесов, что вызывает увеличение концентраций парниковых газов и потепление (Гераськина и др., 2021).

Неравномерность выпадения осадков и их экстремальность способствуют усилению эрозионных процессов. Среднее количество ежегодно смытой почвенной массы достигает 5,8-6,7 т/га, а общее количество смываемого мелкозема на территории России – 1,5 млрд т/ год. Величина смываемого при этом органического углерода почвы может составить 25-30 млн т С/год (Кудеяров, 2015).

Как и во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), опубликованные данные о чувствительности почвенного углерода к изменениям параметров климата по-прежнему разрозненны и противоречивы, вплоть до различий в знаке будущих изменений. Прогнозируется как накопление, так и утрата почвами углерода с диапазоном от глобального секвестирования 310 Гт С до потери 72 Гт С в течение XXI века (Eglin et al., 2010; Lajtha et al., 2018). Природные особенности и потенциал почв России слабо учитываются в глобальных обобщениях. Так, для серой лесной почвы потенциал поглощения составляет около 30 т С/ га, каштановой – не превышает 25 т С/га, луговых почв равен 15-20 т С/га, а черноземов – менее 5 т С/га (Когут, Семенов, 2020).

При современном состоянии науки количественно оценить последствия ожидаемых климатических изменений для баланса углерода почв России практически невозможно. Однако возможны некоторые качественные заключения и прогноз изменения гетеротрофного дыхания. Общим для большинства прогнозов является вывод о нарастающих региональных различиях в реагировании почв на климатические изменения при наибольшей чувствительности лесных экосистем и, что важно для России, криолитозоны, а также широкого спектра органогенных почв, формирующих значительную часть почвенного покрова таежной, лесотундровой и тундровой природных зон. Изменение климата на территории России приведет к увеличению содержания почвенного органического вещества. Данное явление связано с интенсификацией торфообразования в мелкоторфяных болотных почвах на севере и усилением накопления гумуса в почвах на юге, что приведет к снижению концентрации углекислого газа в атмосфере (Национальный доклад, 2018).

### 2.1.2.4 Адаптационные мероприятия по снижению воздействия изменения климата на баланс углерода почв России

Меры по адаптации экосистем и почв, как их составной части, к изменению климата направлены одновременно на сохранение или увеличение общего запаса углерода в почве, что сближает их с мерами по смягчению антропогенного воздействия на климат. Во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) приводилась следующая оценка эффективности: применение адаптационных мер может способствовать снижению эмиссии $CO_2$

на 30-45% (Романенков и др., 2009). В новых публикациях уточняется, что эффективность управления запасами органического вещества почвы в результате адаптационных мероприятий для окультуренных почв тяжелого гранулометрического состава может быть выше, чем для других. Наибольшее накопление органического вещества почвы прогнозируют на северо-западе Нечерноземной зоны – до 14 т С/га за 70 лет, в центральной ее части – до 8, а южнее и восточнее – не более 4 т С/га или будет поддерживаться исходное количество запасов углерода (Романенков, 2019).

Отдельные исследования показывают существование некоторого порога, выше которого увеличение содержания углерода не оказывает положительного влияния на продуктивность (Столбовой и др., 2021).

Появилось множество публикаций, посвященных непосредственно адаптационным мерам и рекомендациям для применения. Их основные направления совпадают с предложенными во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014): предотвращение нарушений, уменьшение эрозии, увеличение прироста биомассы, стимулирование процессов гумусо- и торфонакопления, меры по профилактике, раннему обнаружению и ликвидации природных пожаров, предотвращение пересыхания болот и обводнение заброшенных осушенных торфяников. Лесовосстановление способно обеспечить прибавку зафиксированного почвами углерода на уровне 10-30% от текущих запасов в почвах безлесных угодий (Lajtha et al., 2018).

В агроэкосистемах предлагаются следующие меры:

– внесение органических удобрений для регулирования содержания гумуса во всех без исключения почвах. Их дозы, поддерживающие бездефицитный или положительный баланс гумуса, зависят от типа почвы, климатических условий, севооборота и ряда других факторов (Глинушкин, Соколов, 2017);
– лечение и восстановление деградированных почв (Национальный доклад, 2019);
– применение рациональных агротехнических методов: севооборот, минимальная и нулевая обработки почвы, ресурсосберегающее агропроизводство, агролесоводство, системы агроэкологии (экологическое сельское хозяйство) и др. (Глинушкин, Соколов, 2017; Столбовой, 2018).

Для природно-территориальных комплексов Калмыкии была разработана комплексная модель получения стабильных урожаев в условиях изменения климата. Она одновременно обеспечивает сохранение и повышение плодородия почв, устойчивость агробиоценозов и благоприятную экологическую обстановку в агроландшафтах благодаря включению перечисленных выше мер адаптации (Национальный доклад, 2019).

В мировом сельскохозяйственном производстве также набирает силу подход сбережения и накопления органического углерода в сельскохозяйственных почвах, призванный обеспечить в них положительный баланс органического углерода (Кудеяров, 2019).

В связи с принятием Парижского соглашения по климату, министерство сельского хозяйства Франции предложило развернуть Международную программу «Четыре промилле», в соответствии с которой страны, подписавшие Соглашение, берут на себя обязательства по увеличению на 0,4% органического углерода в год в почвах сельскохозяйственных угодий (Minasny et al., 2017; Иванов, Столбовой, 2019).

Рассматриваемая инициатива – одно из направлений использования почв в мероприятиях по смягчению глобального изменения климата (Иванов, Столбовой, 2019), то есть, строго говоря, не является адаптацией к изменениям климата. Вместе с тем меры по накоплению и сохранению почвенного углерода выделены в качестве приоритетных при адаптации сельского хозяйства для предотвращения потерь урожайности (Национальный доклад, 2019).

Авторы инициативы предлагают использовать на глобальном уровне углерод аккумулирующие технологии, которые стимулируют фотосинтез и, соответственно, увеличивают поступление углерода в почву (Minasny et al., 2017).

Поскольку почвы России достаточно богаты углеродом (373 Гт С в слое 0-2 м), а выбросы в результате сжигания ископаемого топлива составили в среднем 0,68 Гт С/год за период 2010-2019 гг., то ежегодный запас углерода в почвах России достаточно наращивать на два промилле, или на 0,2% в год (Иванов, Столбовой, 2019; рис. 2.1.2.2).

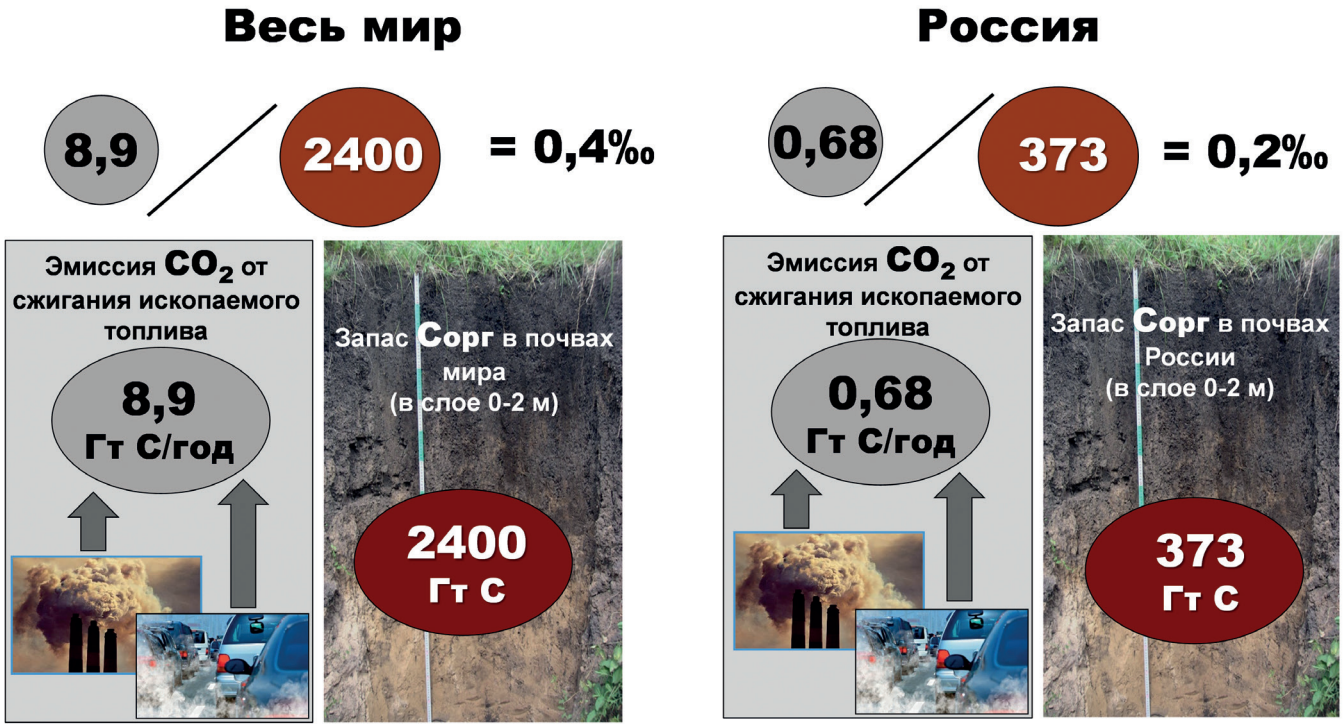



***Рис. 2.1.2.2*** *Инициатива «4 промилле»: задачи мирового сообщества и России (представлено по Minasny et al., 2017; Иванов, Столбовой, 2019)*

Переход на углерод сберегающие технологии сельскохозяйственного производства включает подбор культур, систем удобрений, технологий обработок и др. Результаты анализа данных (рис. 2.1.2.3) свидетельствуют, что наибольший положительный баланс углерода в почвах (+2,4 т С/га) отмечается под многолетними травами, отрицательный (–1,4 т С/га) – под культурой «картофель». Положительный баланс (+1,2 т С/га) формируется также при внесении повышенных доз навоза. Применяемые обработки почв не оказывали существенного влияния на баланс углерода. Перечисленное разнообразие балансов иллюстрирует практическую

возможность управления содержанием углерода в почвах. Так, производство яровой пшеницы по унавоженному пару позволяет ежегодно статистически достоверно накапливать в почве 1,08-1,41 т С/га (рис. 2.1.2.3а). Приведенный пример относится к почвам лесостепной и юга лесной зон. При этом в России разработаны углерод сберегающие технологии и для черноземных почв степной зоны. В пересчете на площадь пахотных земель страны (около 80 млн га) общий объем поглощения может достичь 80,64-112,80 млн т С, что составляет 12-17% от требуемого инициативой «Четыре промилле» национального объема. Механизм инициативы «Четыре промилле» будет действовать успешно в течение 12-15 лет, что соответствует времени восстановления и насыщения пахотных почв углеродом (Иванов, Столбовой, 2019; Столбовой, 2020).

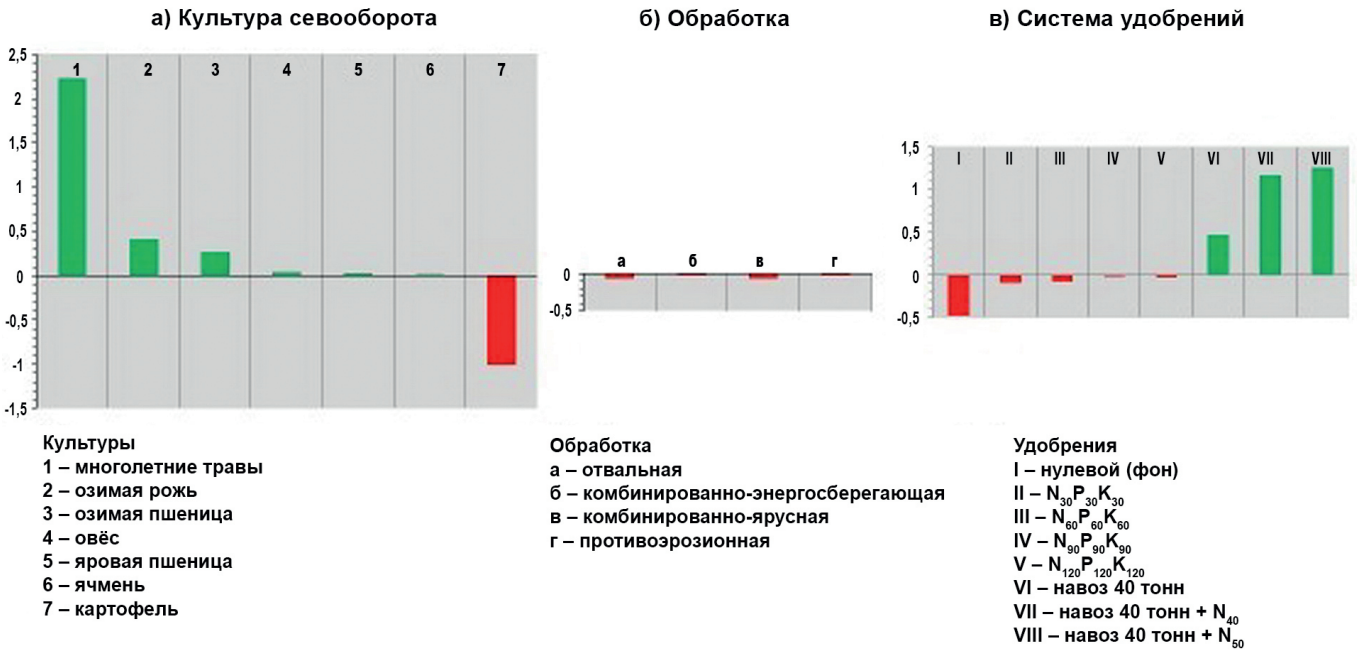



***Рис. 2.1.2.3*** *Факторы управления балансом углерода (т С/га) в пахотных серых лесных почвах Владимирского ополья: а) культуры севооборота; б) способ обработки почвы; в) системы применяемых удобрений (Столбовой, 2020)*

## Список литературы


**Гераськина А. П., Тебенькова Д. Н., Ершов Д. В., Ручинская Е. В., Сибирцева Н. В., Лукина Н. В., 2021:** Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. – Т. 4, № 2. – С. 1-76.

**Глинушкин А. П., Соколов М. А., 2017:** Роль гумуса почвы в адаптации агросферы к изменению климата Земли // Успехи современной науки. – Т. 2, № 9. – С. 15-19.

**Дымов А. А., Габов Д. Н., Дубровский Ю. А., Жангуров Е. В., Низовцев Н. А., 2015:** Влияние пожара в северотаежном ельнике на органическое вещество почв // Лесоведение. – № 1. – С. 52-62.

**ЕГРПР: Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0, 2014** / А. Л. Иванов, С. А. Шоба (ред.). – М.: Гриф и К. – 768 с.

**Иванов А. Л., Савин И. Ю., Столбовой В. С., Духанин Ю. А., Козлов Д. Н., Баматов И. М., 2021:** Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – № 107. – С. 5-32.

**Иванов А. Л., Столбовой В. С., 2019:** Инициатива «4 промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – № 98. – С. 185-202.

**Когут Б. М., Семенов В. М., 2020:** Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – № 102. – С. 103-124.

**Кудеяров В. Н., 2015:** Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. – № 9. – С. 1049-1060.

**Кудеяров В. Н., 2018:** Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. – № 6. – С. 643-658.

**Кудеяров В. Н., 2019:** Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. – № 1. – С. 109-121.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Савин И. Ю., Шорохова Е. В., 2016:** Баланс углерода в лесных экосистемах южного Подмосковья в условиях усиления засушливости климата // Лесоведение. – № 5. – С. 332-345.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Хорошаев Д. А., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Жмурин В. А., Кудеяров В. Н., 2020:** Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. – № 10. – С. 1220-1236.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Жиенгалиев А. Т., Кудеяров В. Н., 2019:** Углеродный бюджет степных экосистем России // Доклады Академии наук. – Т. 485, № 6. – С. 732-735.

**Максимова Е. Ю., Цибарт А. С., Абакумов Е. В., 2014:** Свойства почв Тольяттинского соснового бора после катастрофических пожаров 2010 г. // Почвоведение. – № 9. – С. 1131-1144.

**Маслов М. Н., Копеина Е. И., Маслова О. А., 2019:** Влияние интенсивности пожара на почву горно-тундровых экосистем. В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Е. А. Боровичев, О. И. Вандыш (ред.). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 67-68.

**Национальный доклад, 2019:** Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)». / Р.С.-Х. Эдельгериев (ред.). – М.: Издательство МБА. – Т. 2. – 476 с.

**Национальный доклад, 2018:** Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)» /А. И. Бедрицкий (ред.). – М.: ГЕОС. – 357 с.

**Романенков В. А., 2019:** Почвенный углерод в условиях глобального изменения климата. В сб.: Плодородие почв России: состояние и возможности, В. Г. Сычев (ред.). – М., ВНИИ Агрохимии имени Д. Н. Прянишникова. – С. 177-183.

**Романенков В. А., Романенко И. А., Рухнович Д. И., Королева П. В., Сиротенко О. Д., Шевцова Л. К., Рухович Д. И., 2009:** Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. – М.: ВНИИ Агрохимии имени Д. Н. Прянишникова. – 95 с.

**Росгидромет, 2014. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последстви-**

**ях на территории Российской Федерации, 2014**. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Столбовой В. С., 2020:** Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // Достижения науки и техники АПК. – Т. 34, № 7. – С. 19-26.

**Столбовой В. С., 2018:** Углерод пахотных почв России в стратегии смягчения изменений климата / В кн.: Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона. – Иваново: ИПК «ПресСто». Т. 1. – С. 356-363.

**Столбовой В. С., Петросян Р. Д., Шилов П. М., Лукьянов С. Н., 2021:** Повышение эффективности вложений на обследование неиспользуемых земель в целях их возвращения в сельскохозяйственный оборот // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – № 108. – С. 83-103.

**Худяков О. И., Решоткин О. В., 2017:** Эволюция почв в связи с современным потеплением климата // Теоретическая и прикладная экология. – № 2. – С. 38-43.

**Худяков О. И., Решоткин О. В., 2020:** Динамика температуры мерзлотных почв в вегетационный период на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха // Почвоведение. – № 5. – С. 576-589.

**Dymov A. A., Abakumov E. V., Bezkorovaynaya I. N., Prokushkin A. S., Kuzyakov Y. V., Milanovsky E. Y., 2018:** Impact of forest fire on soil properties // Theoretical and applied ecology, № 4, pp. 13-23.

**Eglin T., Ciais P., Piao S. L., Barre P., Bellassen V., Cadule P., Chenu C., Gasser T., Koven C., Reichstein M., Smith P., 2010:** Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes // Tellus B, v. 62, № 5, pp. 700-718.

**FAO, 2017:** Global Soil Organic Carbon Map. Rome: FAO, Global Soil Partnership, 5 p. https://www.fao.org/documents/card/en/c/fb798a4c-ff06-4468-ad18-27787d1f3456

**Lajtha K., Bowden R. D., Crow S., Fekete I., Kotroczo Z., Plante A., Simpson M. J., Nadelhoffer K. J., 2018:** The detrital input and removal treatment (DIRT) network: insights into soil carbon stabilization // The Science of the Total Environment, v. 640-641, pp. 1112-1120.

**Lal R., 2018:** Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems // Global Change Biology, v. 24, № 8, pp. 3285-3301.

**Lal R., 2020.** Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security // Soil Science and Plant Nutrition, v. 66, № 1, pp. 1-9, doi:10.1080/00380768.2020.1718548.

**Minasny B., Malone B. P., Mcbratney A. B., Field D. J., Odeh I., Padarian J., Stockmann U., Angers D. A., Mcconkey B. G., Arrouays D., Martin M., Richer-deforges A. C., Chambers A., Chaplot V., Chen Z. S., Tsui C. C., Cheng K., Pan G., Das B. S., Gimona A., Poggio L., Hedley C. B., Hong S. Y., Mandal B., Marchant B. P., Mulder V. L., O'rourke S., Paustian K., Savin I., Stolbovoy V., Sulaeman Y., Vagen T. G., Winowiecki L., Van Wesemael B., 2017:** Soil Carbon 4 per mille // Geoderma, v. 292, pp. 59-86.

**Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L., 2021:** Respiration of Russian soils: climatic drivers and response to climate change // Science of the Total Environment, v. 785, 13 p.

**Naidu D. G. T., Bagchi S., 2021:** Greening of the earth does not compensate for rising soil heterotrophic respiration under climate change // Global Change Biology, v. 27, № 10, pp. 2029-2038.

**Rolinski S., Prishchepov A. V., Guggenberger G., Bischoff N., Kurganova I. N., Schierhorn F., Müller D., Müller C., 2021:** Dynamics of soil organic carbon in the steppes of Russia and Kazakhstan under past and future climate and land use // Regional Environmental Change, v. 21, № 3, pp. 1-16, doi:10.1007/s10113-021-01799-7.

**Schlesinger W. H., Amundson R., 2019:** Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic // Global Change Biology, vol. 25, № . 2, pp. 386-389.

**Stolbovoi V., 2003:** Soil respiration and its role in Russia's terrestrial C flux balance for the Kyoto baseline year // Tellus B, Chemical and Physical Meteorology, v 55, issue 2, pp. 258-269.

## 2.1.3 Морские природные системы

***А. Г. Костяной, Т. Р. Еремина, В. В. Иванов, В. Б. Лобанов, А. С. Кровнин, В. М. Амосова, Д. Ф. Афанасьев, В. В. Барабанов, В. Н. Белоусов, Е. В. Волощук, А. И. Гинзбург, С. М. Гордеева, А. В. Долгов, С. В. Жукова, А. С. Зезера, Ю. И. Зуенко, Е. Г. Лардыгина, С. А. Лебедев, В. А. Лучин, Л. И. Мезенцева, А. В. Михайлова, В. П. Разинков, И. Д. Ростов, И. В. Серых, О. О. Трусенкова, Е. И. Устинова, Г. В. Хен***

### 2.1.3.1 Арктические моря

**Температура воздуха**

Исходными данными для анализа пространственно-временных изменений приземной температуры воздуха послужили данные наблюдений 250 стационарных метеорологических станций. Оценки аномалий были получены относительно рекомендованного ВМО стандартного периода 1961-1990 гг. За год принимался период с декабря предыдущего года по ноябрь следующего (Обзор, 2019).

Наиболее высокими темпами повышение температуры происходит в районах приатлантического и притихоокеанского секторов. Так, линейное повышение среднегодовой температуры воздуха в Чукотском море составило около 2,5 °С за 84 года. За последний 30-летний период статистически значимый (на 5%-ном уровне значимости) линейный тренд в ходе среднегодовой температуры прослеживается во всех арктических морях. Наибольшее потепление наблюдается в Карском море – до 4,7 °С. Межгодовые изменения приземной температуры воздуха в наибольшей степени определяются межгодовой изменчивостью крупномасштабной атмосферной циркуляции над северной полярной областью. В последнее десятилетие в основном наблюдались ослабление арктического антициклона и активная циклоническая деятельность над западными арктическими морями (Баренцевым и Карским) и над приполюсным районом Арктики, благодаря чему в этот период преобладали южное и юго-западное направления воздушных потоков, обеспечивающих адвекцию теплых воздушных масс и повышенный положительный фон аномалий приземной температуры воздуха в арктических морях. В среднем по северной полярной области величина аномалии приземной температуры воздуха в эти годы менялась от максимальной: 4,9 °С в 2016 году до 3,7 °С в 2014 году. Наиболее высокие аномалии температуры отмечались в холодный период года. Самые крупные среднегодовые значения аномалий температуры воздуха отмечались в западных арктических морях: Баренцевом и Карском, а также в отдельные годы – в море Лаптевых. В 2019 и 2020 гг. наиболее значимые среднегодовые положительные аномалии температуры воздуха (до 5-6 градусов) отмечались одновременно во всех российских арктических морях, с максимальными аномалиями в Карском море, море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море. В Карском море и в море Лаптевых значения линейного тренда соответственно составили 2,07 и 2,16 °С/30 лет.

В целом можно заключить, что устойчивое повышение температурного фона в последнее десятилетие в значительной степени было

связано с возрастанием повторяемости более высокоширотных траекторий циклонов. Результаты мониторинга состояния приземной атмосферы в северной полярной области позволяют сделать вывод об усилении в последнее десятилетие тенденции к повышению приповерхностной температуры воздуха в российских арктических морях.

**Температура воды**

Исходными данными для анализа пространственно-временных изменений температуры поверхности моря (ТПМ) послужили материалы наблюдений в российских и международных экспедициях, обобщенные в публикациях (Ivanov et al., 2019; Tarasenko et al., 2021; Отчет, 2018, 2019).

Летом температура поверхности в арктических морях в первую очередь определяется продолжительностью безледного сезона, когда происходит интенсивное поглощение тепла в верхнем перемешанном слое, приводящее к повышению его температуры. Другим значимым фактором является адвекция более теплых вод из низких широт. Этот фактор наиболее значим для морей приатлантического и притихоокеанского секторов и может существенно влиять на ТПМ в этих морях и в зимний сезон, когда температура на большей части арктических морей близка к точке замерзания.

В течение последнего десятилетия происходило постепенное удлинение безледного сезона во всех арктических морях. В качестве примера на рис. 2.1.3.1 показано изменение продолжительности безледного сезона в море Лаптевых, которое может рассматриваться как наиболее удаленный от влияния адвективного поступления тепла регион. Экспедиционные наблюдения в отдельные годы в целом демонстрировали тренд на постепенное повышение ТПМ в регионах, где проводились исследования. По данным экспедиций НАБОС-АВЛАП, проанализированных в (Ivanov et al., 2019), в 2013 и 2015 гг. ТПМ в центральной части моря Лаптевых в конце летнего сезона (середина сентября) превышала типичную для этого района в это время температуру, близкую к точке замерзания, на 2,0-2,5 °С. Согласно данным, полученным позднее в экспедиции «Арктика-2018», ТПМ в море Лаптевых в сентябре 2018 г. превышала среднеклиматические значения на 3,1 °С (Tarasenko et al., 2021). Нулевая изотерма располагалась практически повсеместно севернее 80° с.ш., т.е. на 250-300 км севернее ее среднеклиматического положения в летний сезон. ТПМ на границе Карского моря и Арктического бассейна (к северу от мыса Арктический) была положительной и превышала средние климатические значения на 2 °С (Отчет, 2018). Наиболее полная картина произошедших за последнее десятилетие изменений ТПМ вод в российских арктических морях была получена в экспедиции «Трансарктика-2019, 4-й этап», в рамках которой были выполнены гидрологические наблюдения во всех российских арктических морях (Отчет, 2019) (рис. 2.1.3.2).

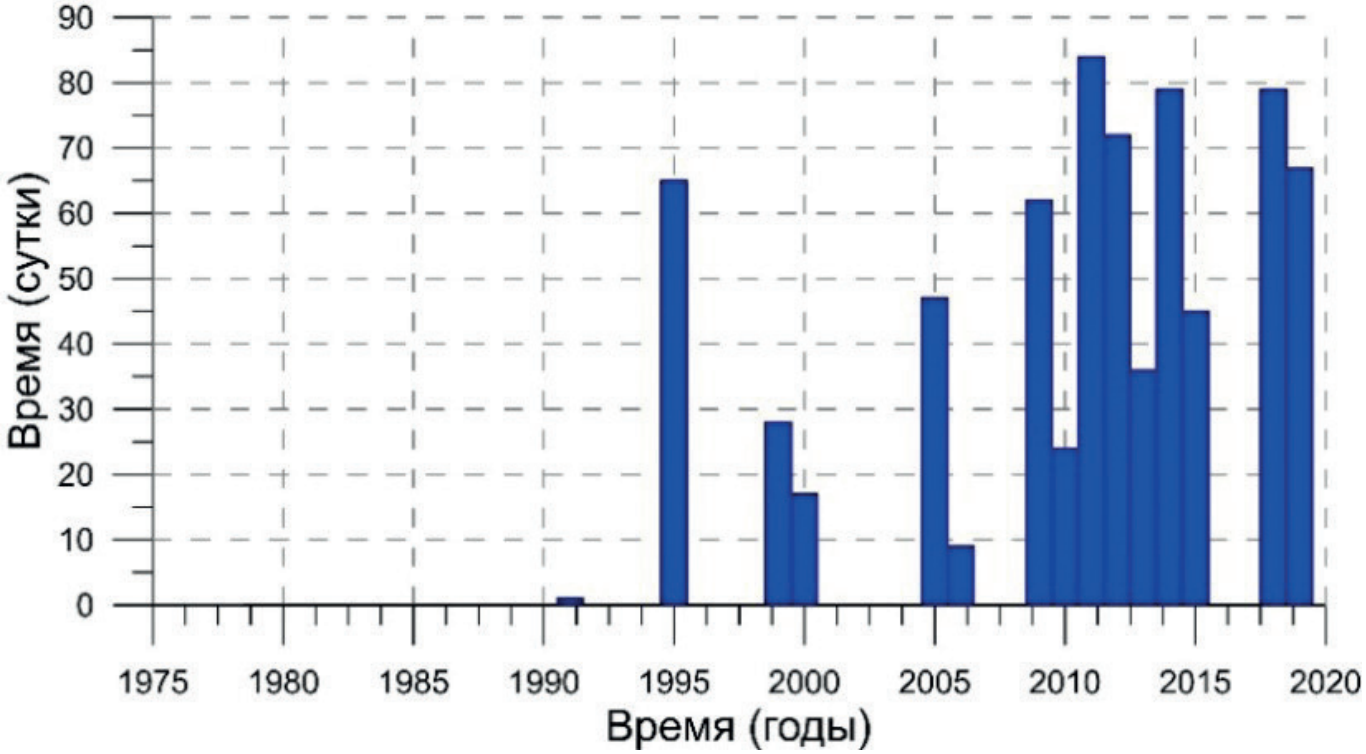



***Рис. 2.1.3.1*** *Временной ряд продолжительности периода открытой воды (концентрация льда меньше 15%) в море Лаптевых. На основе уточненных данных из (Cavalieri et al., 1996)*

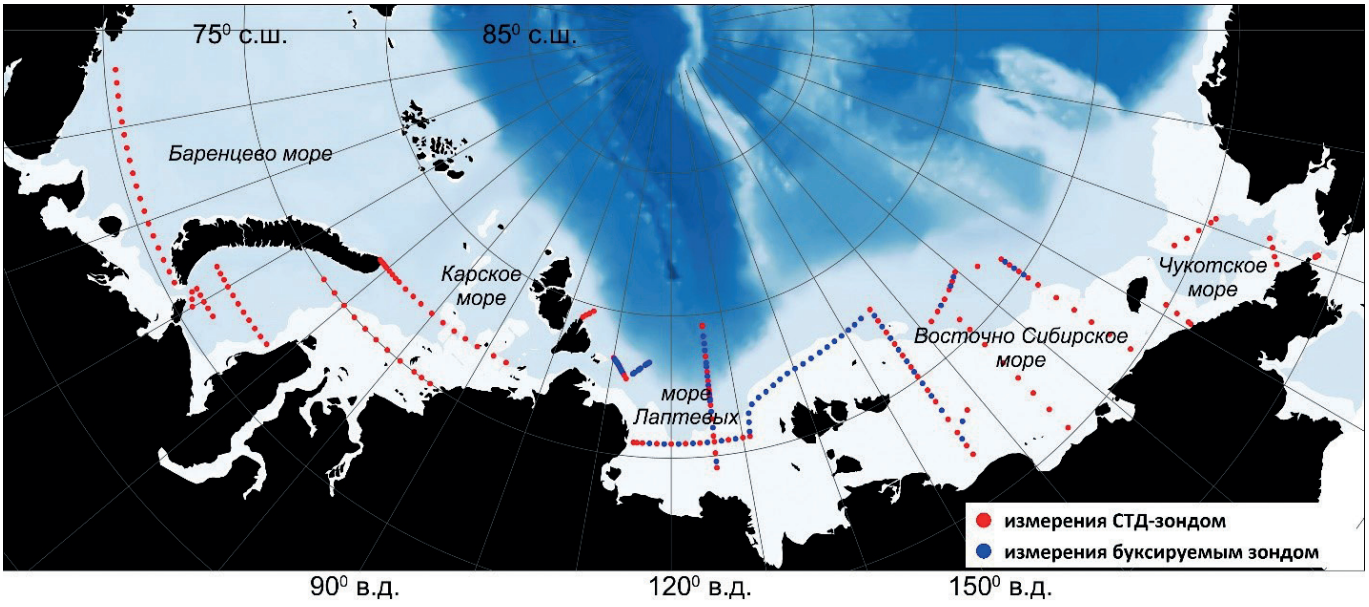



***Рис. 2.1.3.2*** *Схема гидрологических станций в российских арктических морях в экспедиции «Трансарктика-2019, 4-й этап» в августе – октябре 2019 г.*

В Баренцевом море средняя ТПМ (4,1 °С) превысила климатическое среднее на 1,4 °С. При этом положительная аномалия температуры наблюдалась на всем профиле глубин. Максимальная положительная аномалия температуры воды (1,6 °С) зарегистрирована в слое атлантической водной массы на глубине 40 м, что указывает на усиление адвекции теплых вод атлантического происхождения. В Карском море ТПМ (6,4 °С) превысила климатическое среднее поч-

ти на 4 °С. Максимальная положительная аномалия температуры воды была зафиксирована на глубине 15-20 м и составила 6,5 °С, а в глубоководной части моря от 70 м и ниже наблюдалась положительная температурная аномалия (1,5 °С). В море Лаптевых ТПМ (1,1 °С) превысила климатическое среднее на 1,5 °С. При этом положительная аномалия температуры наблюдалась на всем профиле глубин. В Восточно-Сибирском море ТПМ (0,2 °С) превысила климатическое среднее на 1,4 °С. В Чукотском море ТПМ составила 9,8 °С, что превышает климатическую норму на 4,1 °С. Максимальная положительная аномалия температуры воды была зафиксирована на глубине 25 м и составила 5,2 °С. Таким образом, во всех морях наблюдаются значительные положительные аномалии температуры воды от поверхности до дна, что объективно подтверждает тенденцию к продолжающемуся потеплению Арктики.

Важной особенностью современных изменений температуры поверхности в приатлантическом секторе в последнее десятилетие являются также значительные (1,5-2,0 °С) положительные аномалии температуры воды в зимний сезон (Ivanov et al., 2016). Это связано с общим сокращением ледяного покрова в Северном Ледовитом океане и возрастанием влияния океанского тепла на приповерхностный слой океана и ледяной покров (Ivanov, Repina, 2019). Этот процесс, который в современной научной литературе принято обозначать термином «атлантификация» (Аксенов, Иванов, 2018), охватил западную часть бассейна Нансена, северо-восточную часть Баренцева моря и север Карского моря. При этом ряд признаков указывает на то, что подобные тенденции в ближайшие годы могут распространиться и на северную часть моря Лаптевых (Polyakov et al., 2017).

Другой характерной особенностью ТПМ в морях западного сектора (Баренцевом и Карском) являются значительные задержки в начале ледообразования в осенний сезон, вследствие аномального прогрева верхнего слоя в предшествующий летний сезон. В последние несколько лет аналогичные аномалии наблюдались в море Лаптевых с максимумом в 2020 году, когда ТПМ сохранялась заметно выше точки замерзания и ледообразование в центральной части моря началось на один месяц позже среднеклиматических сроков.

**Морской лед**

Рекордное за всю историю спутниковых наблюдений минимальное распространение льда (площадь ледяного покрова, с концентрацией более 0,15) было зафиксировано в сентябре 2012 года (3,57 млн км$^2$), при среднем распространении льда в период летнего минимума в 1980-2000 гг. около 6 млн км$^2$. В течение шести лет после летнего минимума 2007 года летняя площадь льда сохранялась заметно меньшей, чем в предыдущее десятилетие, и существенно меньшей климатической нормы. Одновременно с уменьшением общей площади ледяного покрова произошло смещение баланса между однолетним и многолетним льдом в сторону преобладания однолетнего льда (Kwok et al., 2009). Принципиальным качественным результатом этих количественных изменений стало возрастание сезонности арктического ледяного покрова (Иванов и др., 2013), что подтверждает долгосрочные прогнозы глобальных климатических моделей, причем со значительным опережением. Оценивая сегодняшнее состояние ледяного покрова Северного Ледовитого океана, можно заключить, что после 2007 года оно стабилизировалось на уровне –23 ± 8% (рис. 2.1.3.3) от среднего за период непрерывных спутниковых наблюдений (с 1979 года).

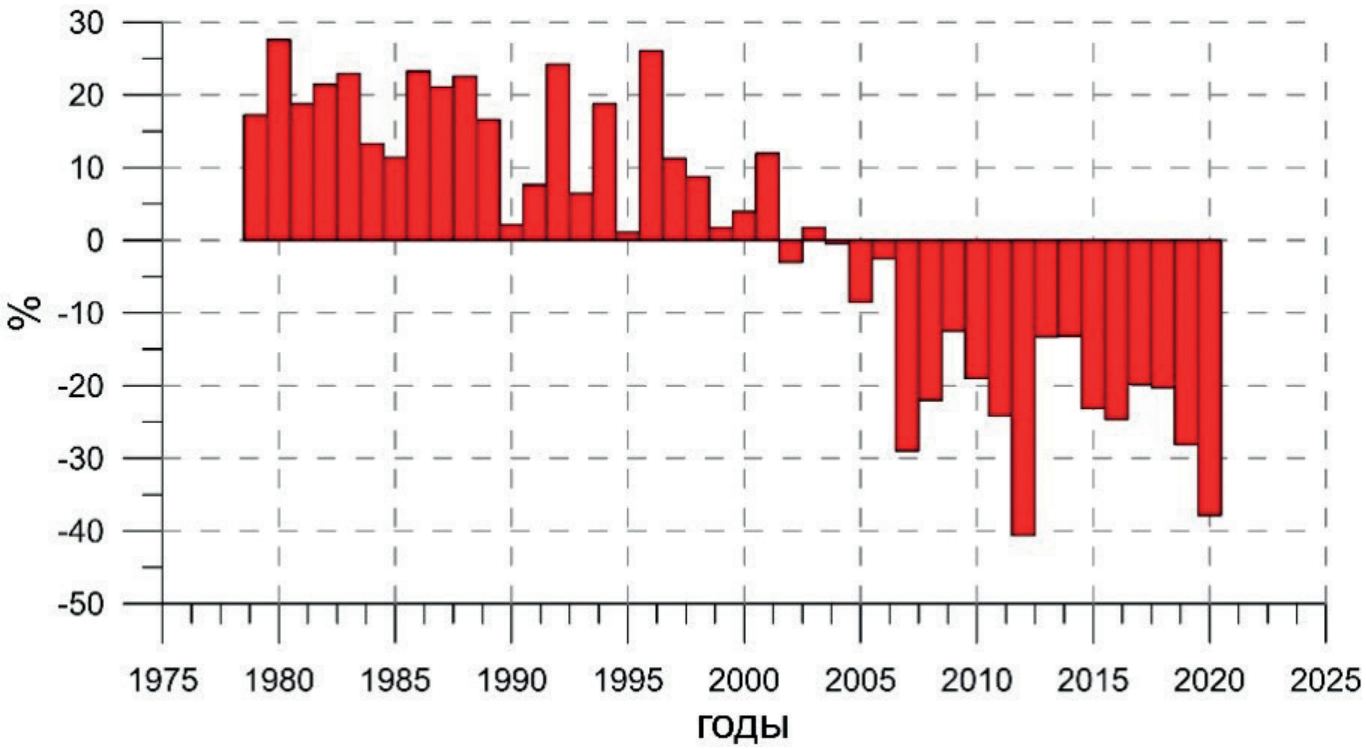



***Рис. 2.1.3.3*** *Аномалия минимального распространения арктического морского льда (концентрация льда 15%) в сентябре (%) относительно среднего значения за период спутниковых наблюдений (1979-2019 гг.). На основе уточненных данных из (Cavalieri et al., 1996)*

Произошедшие изменения в наибольшей степени отразились на ледовом режиме российских арктических морей. На временном интервале 2011-2020 гг. во всех морях наблюдался ряд общих тенденций с незначительными отклонениями в отдельные годы. В первую очередь эти тенденции проявились в практически полном очищении акваторий морей ото льда на пике сезонного минимума ледяного покрова (в среднем – середина сентября). Максимальное отступление границы ледяного покрова к северу наблюдалось в 2012 году, когда все арктические моря были полностью свободны ото льда. В остальные годы ледяной покров сплоченностью до пяти баллов сохранялся в северных частях отдельных морей. При этом наблюдалась определенная оппозиция в площади ледяного покрова в морях западного и восточного секторов Арктики. Ежегодное очищение ото льда большей части арктических морей привело к тому, что ледяной покров в этих морях в основном стал сезонным (однолетним). Незначительное количество сохранявшегося остаточного льда в северных частях морей в 2011-2020 гг. в среднем не превышало 10-15%. Практически полностью исчезли квазистационарные ледяные массивы, существовавшие в арктических морях в XX веке (Захаров, 1996). В последнее десятилетие лишь в отдельные годы небольшие массивы льда сохранялись до конца летнего сезона. Например, в 2013 и 2014 гг. наблюдался небольшой остаточный ледяной массив в восточной части Карского моря.

Переход к сезонному ледяному покрову отразился на средней толщине льда. Анализ изменчивости средневзвешенной толщины льда в российских арктических морях в холодный сезон, выполненный по материалам электронных карт ААНИИ за временной интервал 1997-2018 гг. позволил установить, что скачко-

образный переход к преобладанию однолетнего льда в российских арктических морях датируется 2004 годом (Егоров, 2020). В 2004-2018 гг. площадь льда толщиной менее 70 см увеличилась на 12% по сравнению с 1997-2003 гг., а площадь более толстого льда уменьшилась на 18%. Площадь многолетнего льда уменьшилась примерно в 10 раз с 2004 до 2018 г. Средневзвешенная толщина льда в российских арктических морях к концу холодного сезона уменьшилась примерно на 40 см (с 153 до 117 см) по сравнению с 1997-2003 гг.

Произошли заметные изменения в датах начала ледообразования в сторону возрастания, и в датах начала таяния – в сторону уменьшения. Вследствие этого, в юго-западной части Карского моря продолжительность безледного сезона увеличилась более чем на месяц (Сочнев и др., 2019). Сходные тенденции наблюдаются и в море Лаптевых (см. рис. 2.1.3.2), тогда как Баренцево море по ледовому режиму в последние пять лет приблизилось к рубежу перехода в субполярную климатическую зону (Lind et al., 2018).

В условиях более тонкого и менее сплоченного льда скорость дрейфа увеличилась по сравнению с наблюдавшейся в условиях толстого консолидированного льда. Поскольку арктические моря являются основными зонами зимнего ледообразования, ускорение выноса льда означает возрастание кумулятивного объема образующегося льда. Последнее может оказать значимый эффект на гидрологическую структуру вод на границе шельфа и континентального склона через интенсификацию шельфовой конвекции с возможными последствиями для промежуточных и глубинных водных масс Арктического бассейна и глобальной термохалинной циркуляции (Иванов, 2011).

**Уровень моря**

После понижения среднего уровня в 2010 г., отмечавшегося практически на всей акватории арктических морей, последовавшего за ним повышения среднего уровня в 2011 г. и сохранения повышенного фона в 2012-2014 гг. произошло некоторое снижение фона колебаний уровня моря, особенно существенное в районе Новосибирских остров, где уровень впервые после 2001 г. опустился ниже средних отметок. В последующие годы колебания уровня арктических морей в основном происходили на фоне, превышающем средние многолетние значения. Для большинства станций арктических морей сезонные колебания уровня в целом были близки к типичным и отличались хорошо выраженным годовым ходом с минимумом в весенний период и максимумами в осенний. Особенно стоит отметить подъем уровня до максимальной отметки в районе Новосибирских островов. В целом же как на юго-западе Карского моря, так и в море Лаптевых сохранялась положительная тенденция в межгодовом ходе уровня моря, в отличие от северо-восточной части Карского моря. В межгодовой изменчивости уровня сохраняется положительная тенденция на всех станциях морей Карского и Лаптевых (см. рис. 2.1.3.4).

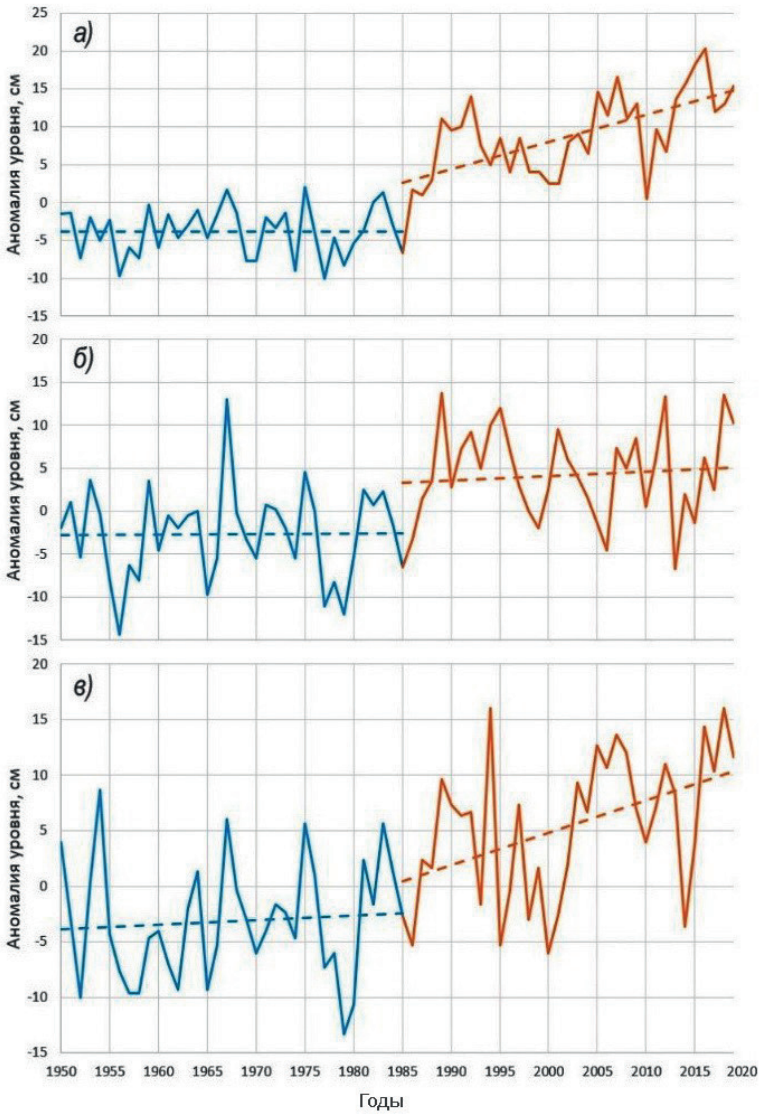



***Рис. 2.1.3.4*** *Аномалии среднегодового уровня моря на акватории юго-западной (а) и восточной (б) части Карского моря и в районе Новосибирских островов (в) (Обзор, 2019)*

**Состояние экосистемы**

Среди арктических морей России Баренцево море характеризуется наибольшим видовым разнообразием морской фауны и имеет наибольшее промысловое значение. С конца 1980-х гг. состояние экосистемы моря изменилось от ситуации с холодными термическими условиями, высокой интенсивностью промысла и низкой биомассой промысловых донных видов рыб к современной ситуации с существенным потеплением вод, возросшей биомассой запасов донных рыб и пониженной интенсивностью промысла. После рекордно высокой температуры в 2016 г. в последующие годы отмечалось некоторое похолодание, но тем не менее температура воды и воздуха по-прежнему остается типичной для теплых лет.

Потепление вод и уменьшение площади ледяного покрова в море способствовало улучшению условий для продукции фитопланктона. За последние 20 лет произошло удвоение чистой первичной продукции (ICES, 2017, 2018, 2019, 2020). В 2000-е гг. произошла бореализация зоопланктонных сообществ Баренцева

моря – увеличение численности тепловодных видов и расширение их ареала на север, что привело к частичному замещению холодноводных арктических видов тепловодными бореальными. После 1995 г. отмечается снижение биомассы мезозоопланктона в районах Центральной возвышенности и Возвышенности Персея, связанное с увеличением доли его малоразмерных фракций и снижением доли средне- и крупноразмерных фракций в сообществе. При этом в целом средний уровень общей биомассы зоопланктона остается на стабильном уровне. Изменения в структуре сообщества мезозоопланктона произошли под воздействием потепления и хищничества со стороны мойвы. В то же время в последние десятилетия отмечается тенденция к росту биомассы макрозоопланктона, в том числе эвфаузиид и желетелого планктона (медуз и гребневиков).

В современный теплый период в Баренцевом море возросла численность тепловодного интродуцированного в 1960-е гг. камчатского краба, промысел которого был начат в 2004 г. Одновременно с 1996 г. в Баренцевом море появился холодноводный краб-стригун опилио, резкое увеличение численности которого привело к открытию в 2012 г. его промысла.

Основные изменения в экосистеме Баренцева моря связаны с его «бореализацией», т.е. экспансией бореальных видов в его северную, арктическую, часть, а также в восточном направлении к архипелагу Новая Земля. С конца 1990-х гг. здесь появилось значительное число новых для этого района тепловодных видов рыб. Эта экспансия наиболее четко выражена у трески, для которой потепление в сочетании с оптимальным регулированием интенсивности ее промысла обусловило значительный рост запаса (Kjesbu et al., 2014; Кровнин и др., 2019). При этом распространение трески на север происходит быстрее, чем предсказывается моделями (Ingvaldsen et al., 2015). В период 2004-2012 гг. географический центр распределения арктических сообществ рыб, в которых доминируют полярный триглопс, черный палтус и липарисы, сместился на 159 км к крайней северной кромке шельфа, где глубины больше, чем в более южных районах ареала (Fossheim et al., 2015). В целом, в Баренцевом море после 2004 г. наблюдается уменьшение площади района обитания арктических видов рыб и его смещение в северном направлении при общем снижении их численности и биомассы, что связано с уменьшением площади и объема арктических вод в море.

Баренцево море служит важным местом нагула для морских птиц и млекопитающих, как постоянно обитающих здесь, так и мигрирующих из более южных районов. По мере потепления, птицы в последнее десятилетие следовали за отступающим морским льдом, и произошло перераспределение сообществ птиц в северном направлении (центр массы чистиковых, чаек и глупышей сместился на 150-300 км севернее). Кроме того, в последние десятилетия отмечается тенденция к росту видового разнообразия и численности морских млекопитающих.

В случае дальнейшего потепления вод Баренцева моря расширение ареала бореальных видов в его северные и восточные районы, а также, вероятно, и в Карское море, продолжится. Однако такие донные виды, как треска, обитающие в мелководных шельфовых зонах на глубинах до 300-400 м, уже практически достигли северной границы континентального шельфа. С учетом рельефа дна они будут продвигаться на восток в районы с подходящими температурными и кормовыми условиями. Вероятно, только пелагические виды, такие как

мойва и сельдь, будут способны мигрировать дальше в северном направлении, в более глубоководные районы. Район распространения и численность арктических видов (в том числе сайки) при этом продолжат сокращаться, и их ареал будет смещаться на север и восток.

Сохранение тенденции к потеплению вод создает перспективы ведения промысла в Карском море и, возможно, в море Лаптевых. Сокращение площади ледяного покрова и увеличение протяженности миграций основных промысловых видов рыб формируют предпосылки для организации здесь лова черного палтуса, трески, пикши, мойвы, сайки, а также отдельных видов проходных рыб.

Потепление Арктики способствует северной экспансии теплолюбивых видов рыб и с ее тихоокеанской стороны. В западной части Чукотского моря увеличивается численность минтая, мигрирующего сюда из Берингова моря. По результатам донной траловой съемки НИС «Профессор Леонидов», в 2019 г. биомасса крупного минтая в этом море более чем в 28 раз превысила показатели съемки 2018 г. и составила 890 тыс. т (Орлов и др., 2020). В этом же рейсе впервые на акватории моря Лаптевых зарегистрированы минтай, синяя зубатка и окунь-клювач, а в восточной части Карского моря, вблизи п-ова Ямал – канинско-печорская сельдь.

В связи с тем что морская экосистема Баренцева моря состоит из двух основных частей (тепловодной бореальной и холодноводной арктической, разделенных Полярным фронтом), современные климатические изменения приводят к изменению соотношения этих частей, а также расположения и площади их распространения. В целом бореальная часть экосистемы расширяется на север и восток одновременно с увеличением ее площади и численности тепловодных видов и сокращением (или полным исчезновением в ней) численности арктических видов. При этом арктическая часть смещается на север, ее площадь сокращается, что приводит к снижению численности арктических видов и их смещению за пределы Баренцева моря (в Карское море или в открытую часть Северного Ледовитого океана).

Аналогичные процессы происходят и в других арктических морях России, однако имеющаяся к настоящему времени информация не позволяет сделать статистически достоверные выводы относительно степени (интенсивности) их развития.

**Ожидаемые изменения**

В настоящее время надежно установлено, что изменения климата в Арктике происходят значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Согласно «мягкому» сценарию RCP2.6 (IPCC, 2014) возрастания эмиссии парниковых газов, между 2010 и 2080 гг. средние зимние температуры в арктическом регионе возрастут на 3-10 °C, а к концу нынешнего столетия до 20 °C. Потепление Арктики уже оказало прямое воздействие на наземные, пресноводные и морские экосистемы (AACA, 2017). Повышенная частота стихийных бедствий, таких как полярные мезоциклоны, экстремальные морские штормы, ледяные дожди и др., напрямую связана с продолжающимся потеплением.

Быстрое повышение планетарной температуры воздуха в 1990-е гг. привело к «скачкообразному» (на климатическом масштабе времени) изменению ледового режима Северного Ледовитого океана – переходу к пониженной

площади ледяного покрова на пике сезонного минимума (в сентябре) в среднем на 23 ± 8% от средней климатической нормы за имеющийся ряд спутниковых наблюдений (1979-2019 гг.) (см. рис. 2.1.3.3). Следствием этого стало несбалансированное тепловое воздействие на границе атмосферы и океана на водную толщу. В силу большой инерционности океана это воздействие начало проявляться не мгновенно, а по прошествии нескольких лет. В ряде недавних публикаций были сформулированы базовые закономерности начавшихся в 2010-е гг. изменений в характере гидрометеорологических процессов в российских арктических морях и прилегающей глубоководной части Арктического бассейна. Установлено, что в 2010-е годы возросло обратное тепловое воздействие океана на ледяной покров и арктическую атмосферу. Это воздействие выражается: (1) в усилении направленного к поверхности океана теплового потока из промежуточного слоя вод атлантического происхождения – так называемая «атлантификация Арктики» (Polyakov et al., 2017; Ivanov, Repina, 2019); (2) в возрастании количества тепла, накапливаемого верхним слоем океана в летний сезон и отдаваемого в атмосферу в последующий зимний сезон (Ivanov et al., 2019). Указанные изменения с высокой степенью вероятности имеют ряд далекоидущих последствий для других гидрометеорологических параметров и арктических экосистем (Lind et al., 2018). Как показано в (Ivanov et al., 2019), в условиях пониженной ледовитости активизация положительной обратной связи в системе «океан – лед – атмосфера» за счет альбедного механизма способствует формированию сезонной «памяти» в системе и дальнейшему сокращению арктического ледяного покрова с вероятными последствиями для климатических и погодных условий в арктических морях и на прилегающих к Северному Ледовитому океану континентах. Более поздние сроки начала ледообразования в море Лаптевых (задержка в 2020 г. составила около одного месяца) уже заметно влияют на вертикальную структуру вод, что было установлено по данным зимних наблюдений, выполненных в 2019 г. на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Мыс Баранова» на архипелаге Северная Земля (Отчет, 2018) и в экспедиции «Трансарктика-2019» (Frolov et al., 2019).

Наблюдаемые изменения гидрометеорологических характеристик в арктических морях заостряют вопрос о возможных сценариях развития ледовых условий в обозримом будущем, поскольку, как можно заключить из представленного обзора, именно параметры ледяного покрова в значительной степени определяют вектор дальнейших изменений.

В случае если наиболее вероятный (на сегодняшний день) прогноз дальнейшего сокращения площади льда оправдается, в арктических морях следует ожидать дальнейшего удлинения сезона открытой воды, возрастания ТПМ, повышения частоты штормовых нагонов и возрастания ветрового волнения. Географически эти тенденции будут постепенно нарастать от западной границы (Баренцево море) и восточной границы (Чукотское море) в направлении моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря соответственно.

Температура воздуха у поверхности (ТВП), которая, в первую очередь, определяется крупномасштабной атмосферной циркуляцией, может как усиливать, так и ослаблять описанные тенденции изменений параметров верхнего слоя океана и ледяного покрова с соответствующими последствиями для арктических экосистем. Продолжающееся повышение ТВП в Арктике

способствует таянию многолетней мерзлоты и высвобождению содержащихся в ней органических веществ, выделяемых в атмосферу в виде углекислого газа и метана. Являясь эффективным парниковым газом, метан усиливает дальнейшее возрастание температуры, обеспечивая положительную обратную связь. Значительный рост температуры придонной воды на мелководных арктических шельфах в летний сезон, происходящий благодаря возрастанию продолжительности безледного сезона, может привести к таянию многолетней мерзлоты на шельфе, что, в свою очередь, может создать дополнительный источник выбросов метана. Согласно ряду существующих оценок, выбросы метана вследствие таяния многолетней мерзлоты могут привести к катастрофическим последствиям для планетарного климата (Shakhova et al., 2010). Однако в настоящее время не существует единой точки зрения, насколько описанный процесс значим для температурного режима прибрежных арктических районов.

### 2.1.3.2 Балтийское море

Результаты дальнейшего изучения изменения климата в Балтийском регионе показали, что тенденция потепления в прошедшем десятилетии сохраняется и, вполне вероятно, будет продолжаться в течение всего двадцать первого века. Также очевидны изменения в гидрологическом цикле, которые, как ожидается, будут становиться все более ярко выраженными в ближайшие десятилетия. Основными показателями, на базе которых строились прогностические предположения, являлись повышение температуры поверхности моря, изменение стока рек, возможное распреснение моря, рост уровня, сокращение длительности ледового периода и площади покрытия льдом (Lehmann et al., 2011, BACC, 2015, Росгидромет, 2014).

**Температура воздуха**

В последнее десятилетие в регионе Балтийского моря тенденция повышения температуры воздуха сохранилась, хотя некоторые зимы (2010-2011 гг.) были относительно холодными. Рост среднегодовых значений температуры воздуха в течение 1876-2018 гг. в Балтийском регионе превышает значения, наблюдаемые в других районах земного шара. Повышение температуры воздуха происходило неравномерно и сопровождалось значительными колебаниями, разделяющими XX век на три основные фазы: (1) потепление в начале века до 1930-х годов; (2) похолодание до 1960-х годов; и (3) еще одно отчетливое потепление в последнее десятилетие XX века, продолжающееся до настоящего времени (Rutgersson et al., 2014). Все сезонные тенденции являлись положительными, за исключением зимней температуры воздуха севернее 60° с.ш. (из-за большой межгодовой изменчивости). Наибольшие тенденции к потеплению наблюдались весной, а наименьшие – летом, с наиболее ярко выраженными сезонными тенденциями в северной части Балтийского региона по сравнению с южной. В течение последнего десятилетия в регионе наблюдались рекордные волны тепла (в 2010, 2011, 2018 и 2021 гг.) с тенденцией к увеличению продолжительности теплого периода и сокращению количества морозных дней.

**Температура воды**

Балтийское море, полузакрытый бассейн, находящийся как под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, так и близости суши. Кроме того, Балтийское море является одним из самых больших солоноватых морей в мире, что обуславливает особенности его гидрофизического режима. На основе анализа спутниковых

данных температуры поверхности моря ранее было установлено, что прогрев моря за период с 1982 по 2012 г. по среднегодовым данным составлял 1-2 градуса (Høyer, She, 2007; Høyer, Karagali, 2016) и 3-5 градусов по данным только за июль – сентябрь. Это было подтверждено в Докладе о состоянии океана II (Mulet et al., 2018).

В рассчитанных трендах (рис. 2.1.3.5) изменение ТПМ Балтийского моря (к востоку от 9° в.д.) составляет 0,043° ± 0,01 °C/год, что дает среднее потепление на 1,1 °C за рассматриваемый период (Mulet et al., 2018). Тенденция роста температуры поверхности для Балтийского моря выражена сильнее, чем для районов Северного моря, Иберийской части Атлантики и Норвежского моря. Средний тренд ТПМ для этих районов составляет 0,034 ± 0,02 °C/год, что соответствует среднему увеличению температуры на 0,84 °C за аналогичный период. Повышение температуры является характерным для большей части акватории Балтийского моря. Температура поверхности моря Датских проливов, Рижского и Ботнического заливов росла на протяжении 1989-2014 гг. гораздо интенсивнее, чем в юго-восточной части Балтийского моря, примерно на +0,5 °C за 10 лет (Серых, Костяной, 2019). Однако, по современным данным, наибольшее потепление отмечается в Финском заливе (рис. 2.1.3.5).

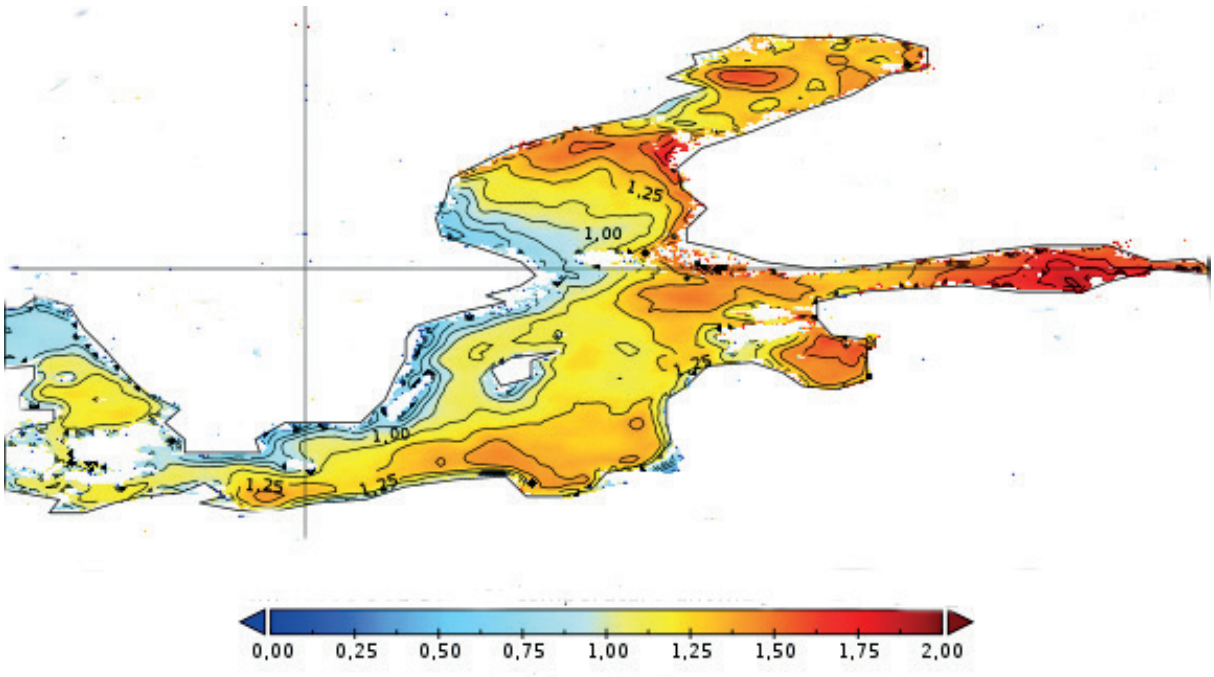



***Рис. 2.1.3.5*** *Линейный тренд изменения среднегодовой температуры (°C) поверхности Балтийского моря по данным спутниковых наблюдений 1993-2017 гг.*

**Соленость**

Изменение климата существенно влияет на соленость Балтийского моря, поскольку меняются режим осадков, речной сток, атмосферная циркуляция и частота затоков североморских вод. Соленость вод Балтийского моря приблизительно в пять раз ниже средней солености Мирового океана. Так, на поверхности она составляет всего 7‰, а на дне – 11-13‰. В динамике солености период распреснения поверхностных вод, начавшийся в 1980-х гг., продолжается до настоящего времени, несмотря на некото-

рое повышение солености после затоков североморских вод в 2003, 2014 гг. Соленость глубинных вод снижалась с конца с 1970-х гг. до 1993 г. Резкое увеличение солености под галоклином было обусловлено затоком соленых вод в 1993 году. После затока соленость продолжала увеличиваться до 2018 г. Снижение частоты и интенсивности затоков отмечалось в период 1983-1993 гг. После затоков 1993 и 2003 гг. наступил длительный период стагнации, который закончился в декабре 2014 г., когда произошел третий по величине за весь период имеющихся наблюдений заток из Северного моря. Однако за тридцатилетний период (1979-2018 гг.) изменений частоты затоков не выявлено (Lehmann et al., 2021). Соленость воды верхнего слоя моря, несмотря на смену знака тренда на положительный после 2000 г. и более заметный рост абсолютных значений с 2017-2019 гг., по-прежнему характеризуется на основной акватории Балтики отрицательными аномалиями (Карпушевский и др., 2013; ICES Advice, 2021).

**Уровень моря**

Многолетние и межгодовые колебания уровня моря тесно связаны с внутренней изменчивостью, наблюдаемой в масштабе бассейна, и эти вариации могут сильно влиять на население, живущее в прибрежных районах (Oppenheimer et al., 2019). Изменения уровня (рис. 2.1.3.6) получены из сетки карты аномалий уровня моря на основе измерений альтиметра DUACS delayed-time (версия DT-2018, sealevel_glo_phy_climate_l4_rep_observations_008_057). Средний по бассейну уровень в Балтийском море повышался со скоростью 4 мм/год за период 1993-2019 гг. с погрешностью ±2,2 мм/год (90%-й доверительный интервал, (Legeais et al., 2018)). Однако относительный уровень моря снижается в северной части и растет на юге вследствие влияния подвижек земной коры и изменения объема вод. Для Балтийского моря, которое представляет собой относительно небольшой полузакрытый бассейн с небольшой глубиной, характерна значительная межгодовая изменчивость уровня моря в сравнении с открытыми районами океана.

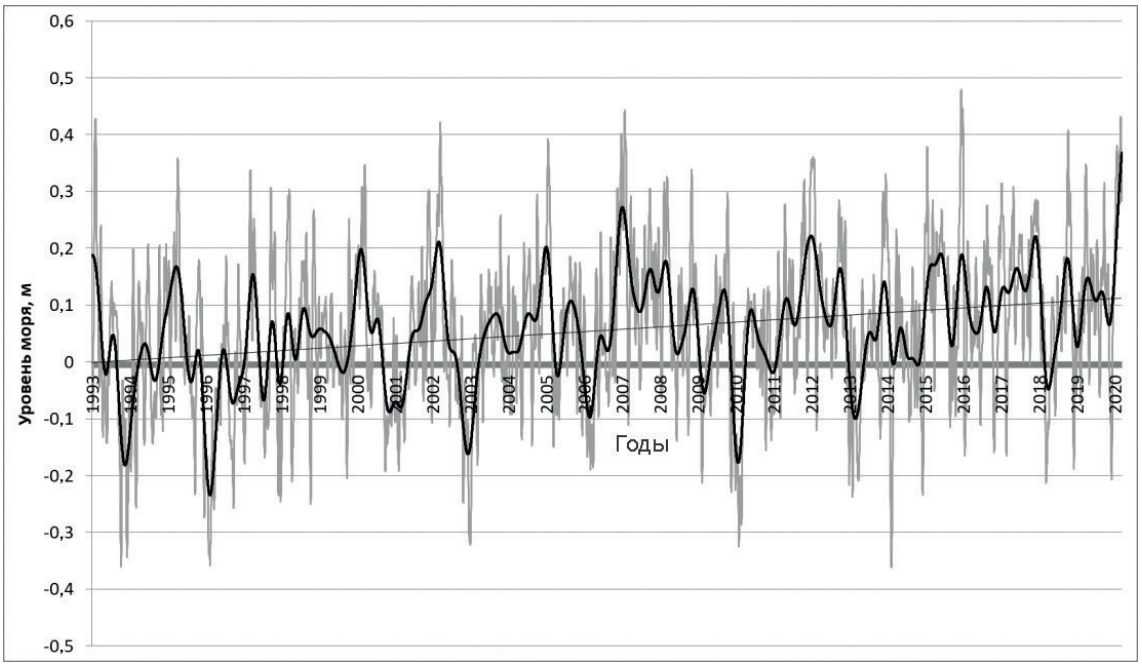



***Рис. 2.1.3.6*** *Изменчивость среднего уровня Балтийского моря (тонкая линия – суточные данные, жирная – сглаженные значения) по данным альтиметрических измерений*

**Морской лед**

За последние 100 лет максимальная площадь ледяного покрова Балтийского моря уменьшается со скоростью 3400 км$^2$ за 10 лет (около 2%) (BACC, 2015). Кроме этого, за последние 20 лет снизилась частота суровых зим, а зим с почти полным ледяным покрытием моря не наблюдалось последние 25 лет. Согласно современным оценкам (CMS, 2020), тенденция сокращения длительности покрытия моря льдом сохраняется (рис. 2.1.3.7). Отрицательные значения тренда –1…–2 дней/год отмечаются во всем Ботническом заливе, в восточной части Финского залива и в западной части Центральной Балтики.

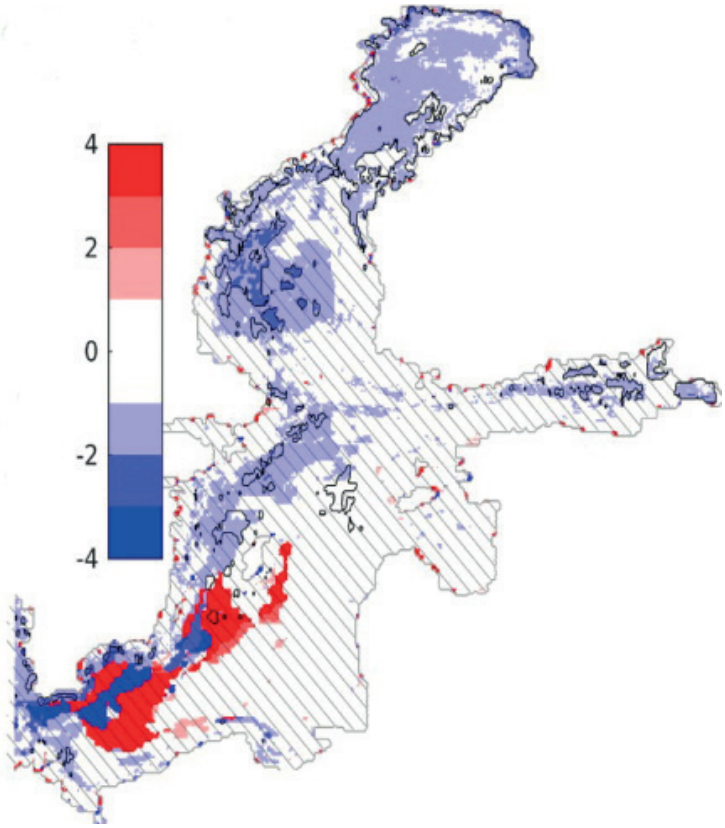



***Рис. 2.1.3.7*** *Статистически значимый рассчитанный тренд в изменении продолжительности ледяного покрытия (дней/год) за период 1982-2019 гг. в Балтийском море (CMS, 2020)*

**Состояние экосистемы**

Многочисленные исследования, обобщенные во Втором Оценочном докладе по изменению климата в Балтийском бассейне (Еремина и др., 2014), подтверждают, что современное состояние экосистем Балтийского моря формируется в условиях заметных климатических изменений, а тенденция потепления сохранится и, вполне вероятно, будет продолжаться в течение всего XXI века. Как отмечалось выше, регион Балтийского моря нагревается быстрее, чем другие моря, и изменение климата усиливает давление на экосистему моря, уже пострадавшую от широкого спектра антропогенных воздействий, таких как эвтрофикация, загрязнение, перелов рыбы и утрата среды обитания (HELCOM, 2019). В результате климатических изменений уменьшение частоты адвекций соленой и богатой кислородом воды из Северного моря оказало существенное влияние на состояние экосистемы моря. За два десятилетия произошло пятикрат-

ное увеличение площади гипоксийных и бескислородных областей в Балтике. Расширение таких областей (часто называемых «мертвыми зонами») может иметь множественное прямое и косвенное воздействие на водные организмы и целые экосистемы в морских, солоноватоводных и пресноводных местообитаниях (Casini et al., 2016). На фоне сохраняющейся тенденции регионального потепления происходят изменения в биологических сообществах, сдвиги в структуре пищевых цепей и продуктивности (BACC, 2015), происходит эволюция морских организмов от микроорганизмов до морских млекопитающих и птиц (BACC, 2015).

За последние несколько десятилетий экосистема Балтийского моря претерпела заметные структурные изменения и режимные сдвиги, вызванные сочетанием различных стресс-факторов, в первую очередь таких, как рыболовство (пресс промысла). Это нашло отражение в видовом составе, численности, пространственном распределении и функционировании зоопланктонного и рыбного сообществ (Feldman, Vasilieva, 2001; Feldman et al., 2002; MacKenzie, Koster, 2004; Зезера, 2009; Зезера, Иванович, 2011; Зезера и др., 2014; Амосова и др., 2017, 2018, 2020). В целом, экосистема Балтийского моря в конце 1980-х – начале 1990-х гг. перешла в новое качественное состояние вследствие режимного сдвига в его ихтиоценозе от системы, в которой доминировала треска, к системе с доминированием шпрота (MacKenzie, Koster, 2004; WGIAB, 2011; WGBFAS, 2011). С точки зрения рыболовства наиболее важными были изменения, определившие новое качество морского биоценоза, характеризующиеся доминированием более мелких видов рыб, а внутри отдельных видов – особей более мелкого размера и массы (Daufresne et al., 2009). Согласно климатическим прогнозам с использованием современных региональных климатических моделей (BALTEX, 2006; BACC, 2008), ожидается улучшение условий для доминирования теплолюбивых эвригалинных видов в экосистеме моря, которые в целом будут благоприятны для развития популяций шпрота, в меньшей степени – для сельди, а наиболее уязвимой в этом аспекте останется популяция трески (Зезера и др., 2014).

**Ожидаемые изменения**

Прогнозы, построенные на основе сценариев изменений климата для региона Балтийского моря, предсказывают увеличение температуры и количества осадков с последующим повышением температуры поверхностного слоя моря, сокращением длительности ледостава, увеличением речного стока, уменьшением солености воды (BACC, 2015). При рассмотренных сценариях изменения климата потепление приведет к увеличению площади бескислородных и гипоксийных зон (Рябченко и др., 2016; Еремина и др., 2016). Мультимодельный ансамбль 58 сценарных расчетов состояния Балтийского моря в XXI веке, выполненный шестью эко-гидродинамическими моделями, показал, что реализация Плана действий HELCOM по Балтийскому морю может привести к значительному улучшению его экологического состояния (Meier et al., 2018).

Опреснение Балтийского моря приведет к качественному и количественному обеднению морской фауны (Vuorinen et al., 2015). Повышение температуры поверхностного слоя, по-видимому, следует рассматривать в качестве одной из основных причин успешного вселения в Балтийское море экзотических видов из регионов с более теплым климатом (Holopainen et al., 2016). В частности, со времени публикации предыдущего доклада в российских водах Фин-

ского залива отмечено появление двух видов, происходящих из субтропических районов североамериканского континента. Изменения видового состава повлекут за собой трансформацию трофической структуры природных сообществ, образование так называемых новых экосистем с неизвестными нам свойствами. Повышение температуры, по-видимому, также приведет к нарушению естественных фенологических циклов, сдвинув начало развития разных организмов на более ранние сроки, что в свою очередь может иметь неблагоприятные последствия на экосистемном уровне вследствие нарушения сложившихся трофических взаимоотношений. В планктонных сообществах, вероятно, будет наблюдаться ослабление весеннего максимума развития диатомовых водорослей. Усиленный прогрев и стратификация поверхностных вод в летнее время будут стимулировать развитие азотфиксирующих цианобактерий. В зоопланктоне возрастет роль теплолюбивых мелких ветвистоусых ракообразных и коловраток.

Развитие бентических сообществ в Балтийском море в значительной степени определяется кислородным режимом придонных вод. Считается, что современные климатические изменения способствуют стагнации водной толщи, ухудшению кислородного режима глубинных вод Центральной Балтики и расширению площадей непригодных для макрозообентоса гипоксийных участков дна. Однако в российских водах Финского залива, по-видимому, следует ожидать противоположной тенденции. Ослабление соленостной стратификации и сокращение ледового периода ведут к интенсивному перемешиванию и аэрации водной толщи, формируя благоприятные условия для развития бентоса.

Изменения климата будут усиливать отрицательное действие хозяйственной деятельности человека на морские экосистемы, в частности, эвтрофирования. Увеличение атмосферных осадков и речного стока приведут к росту внешней биогенной нагрузки с водосбора. Прогрев воды в летнее время способствует поступлению в водоем дополнительной массы атмосферного азота вследствие развития азотофиксирующих цианобактерий (Kahru et al., 2020). Потепление климата также сопровождается усилением внутренней биогенной нагрузки вследствие ухудшения кислородного режима придонных вод Центральной Балтики. Климатические изменения в значительной степени обесценили положительный эффект дорогостоящих природоохранных мероприятий в эстуарии Невы.

В настоящее время (период 1991-2020 гг.) происходит адаптация водных биологических ресурсов Балтики к существованию в новых условиях функционирования различных компонентов экосистемы моря. На фоне современных климатических изменений потенциальные прямые и косвенные эффекты абиотических факторов на состояние запасов трески, сельди и шпрота (обитающих на границах своих ареалов) значительно усилились. Соответственно, повысилась и вероятность экологических неопределенностей и рисков, связанных с использованием водных биологических ресурсов (Амосова и др., 2018; Труфанова, Амосова, 2021).

### 2.1.3.3 Южные моря

**Температура воздуха**

Близко расположенные Черное, Азовское моря и большая часть Каспийского находятся в одном широтном географическом поясе – зоне умеренного климата. Поэтому тенденции изменения температуры воздуха у поверхности (ТВП) над этими морями, при

некоторых региональных отличиях, в основном схожи (Костяной и др., 2014). По данным метеостанции г. Геленджик, за период 1935-2017 гг. тренд ТВП Черного моря был равен +0,17 °С/10 лет, тогда как за период с 1987 по 2017 г. он увеличился почти втрое и составил +0,51 °С/10 лет (Мельников и др., 2018). За 15-летний период 2003-2017 гг. линейный тренд ТВП над Каспием оказался равным +0,40 °С/10 лет (Гинзбург, Костяной, 2018). Полиномиальная аппроксимация среднемесячных данных реанализа NCEP/NCAR в период 1948-2017 гг. (Kazmin, 2021) показала, что среднегодовые значения ТВП над Каспием уменьшались в среднем в 1948-1968 гг., возрастали в 1968-2002 гг. и снова уменьшались до 2017 г. Максимальные среднегодовые значения ТВП наблюдались в 1996 и 2010 гг. (≈ 15 и 14,5 °С соответственно), минимальная в 2000-х годах – в 2017 г. (12,2 °С).

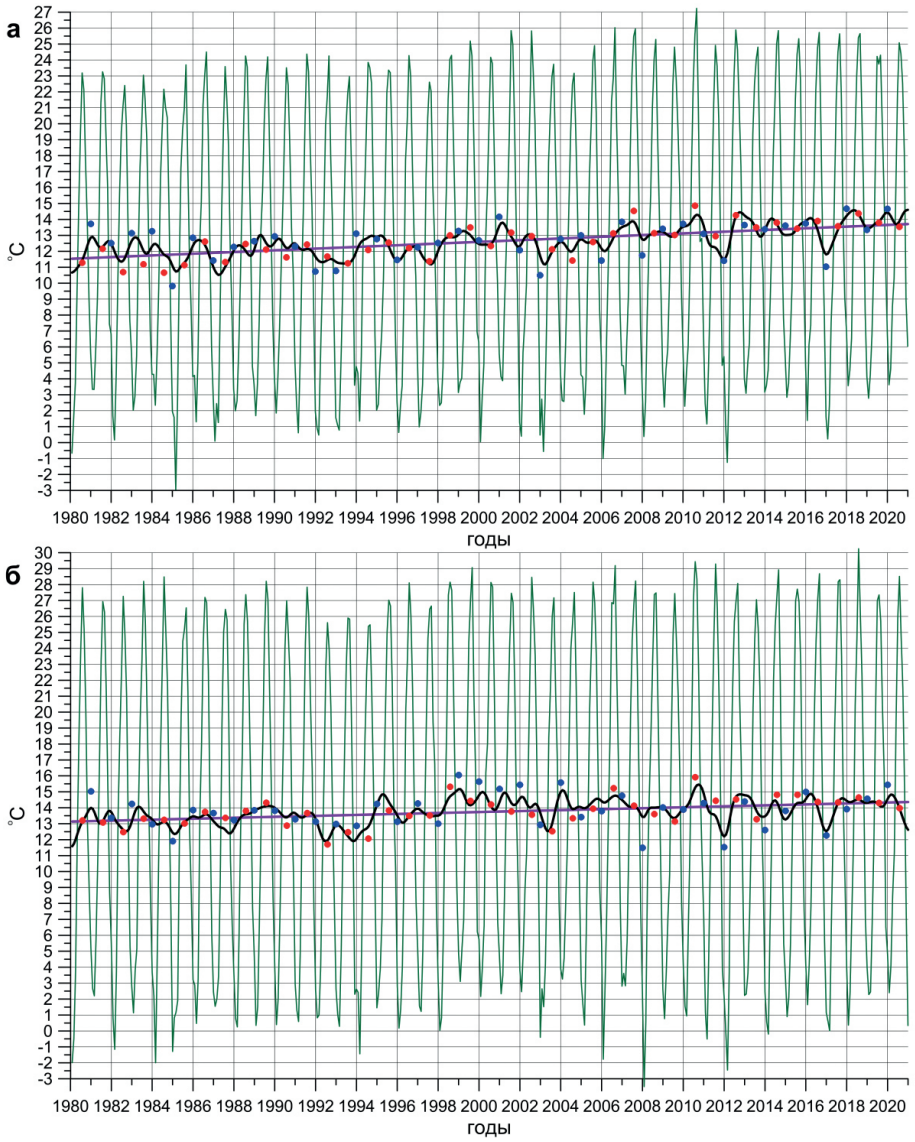



***Рис. 2.1.3.8.*** *Изменения среднемесячной температуры воздуха на высоте два метра от поверхности (зеленый цвет) Черноморско-Азовского (40-48° с.ш., 27-42° в.д.) (а) и Каспийского (36-48° с.ш., 46-55° в.д.) (б) регионов, ее аномалий относительно среднего годового хода, сглаженных однолетним фильтром Баттерворта нижних частот (черный) и линейный тренд этих аномалий (фиолетовый). Красными кружками отмечены средние значения аномалий летнего сезона (июнь – август), синими кружками – зимнего (декабрь – февраль)*

За 41-летний период (с января 1980 по декабрь 2020 г.) ТВП над Черноморско-Азовским регионом (40-48° с.ш., 27-42° в.д.) увеличивалась со скоростью +0,53 °С/10 лет (Гинзбург и др., 2021а), над Каспийским морем (36-48° с.ш., 46-55° в.д.) – со скоростью +0,30 °С/10 лет (Гинзбург и др., 2021б). С конца 1990-х гг. максимальные летние значения ТВП над Черноморско-Азовским регионом и Каспием заметно возросли (рис. 2.1.3.8а и 2.1.3.8б соответственно). В 2000-е гг. увеличились в среднем и минимальные зимние значения ТВП, а также число мягких зим. Однако заметно и более частое повторение экстремально низких температур (зимы 2002/2003, 2005/2006, 2007/2008, 2011/2012 и 2016/2017 гг.). Особенно суровой в южных морях была зима 2011/2012 г., когда аномально холодная погода наблюдалась в январе и феврале в центральной и южной Европе (Matishov et al., 2014b).

**Температура воды**

В период 1982-2009 гг. средняя скорость роста ТПМ в Черном море составляла ~ +0,6 °С/10 лет, в центральной части Азовского моря и в открытой части Таганрогского залива – +0,6 и +0,5 °С/10 лет соответственно (в теплый сезон апрель – ноябрь), в Среднем и Южном Каспии – +0,6 и +0,5 °С/10 лет соответственно (Костяной и др., 2014). Во второй декаде 2000-х гг. изменения ТПМ в Черном и Азовском морях отличались от таковых в Каспийском (Гинзбург и др., 2021а, б).

По данным работы (Miladinova et al., 2017), тренд ТПМ в Черном море в 1995-2015 гг. составил +0,52 °С/10 лет. Оценка тренда ТПМ в работе (Avsar et al., 2018) для периода с сентября 1981 по ноябрь 2015 г. дала +0,40 °С/10 лет. По данным метеостанции в Геленджике (Мельников и др., 2018), за период 1935-2017 гг. тренд ТПМ составил +0,31 °С/10 лет, а за период 1987-2017 гг. он увеличился более чем вдвое (+0,72 °С/10 лет). В 39-летний период 1982-2020 гг. тренд ТПМ в Черном море оказался равным +0,52 °С/10 лет (Гинзбург и др., 2021а) (рис. 2.1.3.9а). Максимальные летние значения ТПМ, начиная с конца 1990-х гг., заметно возросли (максимум 26,94 °С – в 2010 году, когда с конца июня в течение 55 дней над центральной частью Европейской России стоял блокирующий антициклон и над Каспием распространялся воздух из Средней Азии (Arpe et al., 2012; Костяной и др., 2014)). Зимние минимумы в 2000-х гг. часто оказывались выше 8 °С (рис. 2.1.3.9а). Среднегодовая температура воды, начиная с 2010 г., часто превышала 16 °С (максимум 16,71 °С – в 2018 г.) (Гинзбург и др., 2021а).

Характер изменения среднегодовых значений ТПМ в Черном и Азовском морях в основном одинаков (Гинзбург и др., 2011); разница между ними в разные годы составляет 2-3 °С (Гинзбург и др., 2021а). По данным Дашкевич и Кулыгина (2019), среднегодовая ТПМ в 2000-2015 гг. по сравнению с 1982-1999 гг. увеличилась в среднем на 0,95 °С в самом Азовском море и 0,84 °С в Таганрогском заливе. Тренд среднегодовой ТПМ в период ее роста с середины 1990-х до 2010 г. составил +0,5 °С/10 лет в самом море и +0,4 °С/10 лет в Таганрогском заливе.

В 1982-2020 гг. в Каспийском море среднемесячная ТПМ увеличивалась со скоростью +0,35 °С/10 лет (Гинзбург и др., 2021б). Как и в Черном море, в 2000-е гг. в Каспии произошло увеличение максимальных летних значений ТПМ (с максимумом 28,31 °С в 2010 г.),

минимальных зимних, увеличилось число мягких зим (рис. 2.1.3.9б). Тренды среднегодовой ТПМ в 1982-2020 гг. в Северном, Среднем и Южном Каспии и в море в целом составили +0,26, +0,42, +0,34 и +0,35 °С/10 лет соответственно (Гинзбург и др., 2021б). Однако значительно меньшие значения трендов ТВП и ТПМ в Каспийском море в 1982-2020 гг. по сравнению с трендами для периодов, не захватывающих последние годы (Костяной и др., 2014), а также уменьшение среднегодовых ТПМ после максимума 2010 г. свидетельствуют о замедлении потепления Каспийского моря (в отличие от Черного) во вторую декаду 2000-х гг. (Гинзбург и др., 2021б).

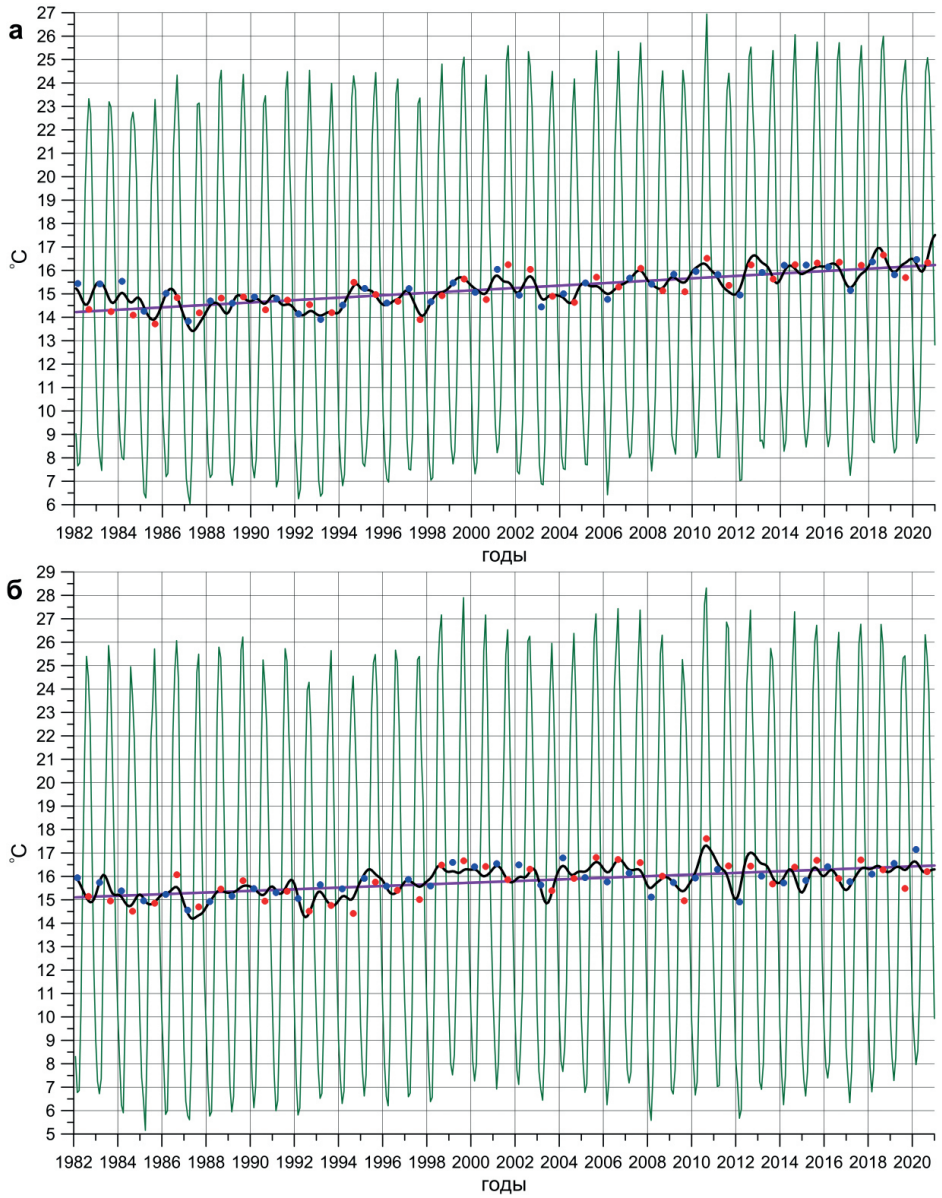



***Рис. 2.1.3.9*** *Изменение среднемесячной температуры поверхности (зеленый цвет) Черного (а) и Каспийского (б) морей, ее аномалий относительно среднего годового хода, сглаженных однолетним фильтром Баттерворта нижних частот (черный), и линейный тренд этих аномалий (фиолетовый). Красными кружками отмечены средние значения аномалий летнего гидрологического сезона (июль – сентябрь), синими – зимнего (январь – март)*

**Уровень моря**

В Черном море с 1920-х до середины 1990-х гг. уровень повышался со средней скоростью 0,17-0,18 см/год (Костяной и др., 2014). С 1993 г. характер изменчивости уровня в разные периоды времени прослеживался в ряде работ на основе альтиметрических измерений. Так, по данным альтиметров спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason 1/2 (J1/2), средняя для 1993-2012 гг. скорость подъема уровня оказалась равной +0,82±0,18 см/год (Костяной и др., 2014). Примерно такая же оценка тренда уровня для 1992-2005 гг. (+0,76±0,03 см/год) получена Кубряковым и Станичным (2013). Существенно меньшие оценки тренда имеют место для более длительного периода: +0,31 см/год (Kubryakov et al., 2017) и +0,32±0,08 см/год (Avsar et al., 2018) для 1993-2014 гг., +0,25±0,05 см/год для периода с января 1993 по май 2017 г. (Avsar, Kutoglu, 2020).

Близкое значение тренда уровня Черного моря (+0,32±0,16 см/год) получено в работе (Гинзбург и др., 2021а) по данным T/P и J1/2/3 для 28-летнего периода 1993-2020 гг. (рис. 2.1.3.10). Скорость подъема уровня моря в этот период уменьшилась по сравнению с 1993-2012 гг. примерно в 2,5 раза, хотя осталась еще примерно в 1,8 раза большей, чем в 1920-1990-х гг. Смена тенденции изменения уровня моря от его повышения (в среднем) к чередующимся периодам понижения/подъема произошла в 2004-2005 гг., причем отрезки времени с повышением уровня стали в основном более короткими, а понижения – более длительными (рис. 2.1.3.10).

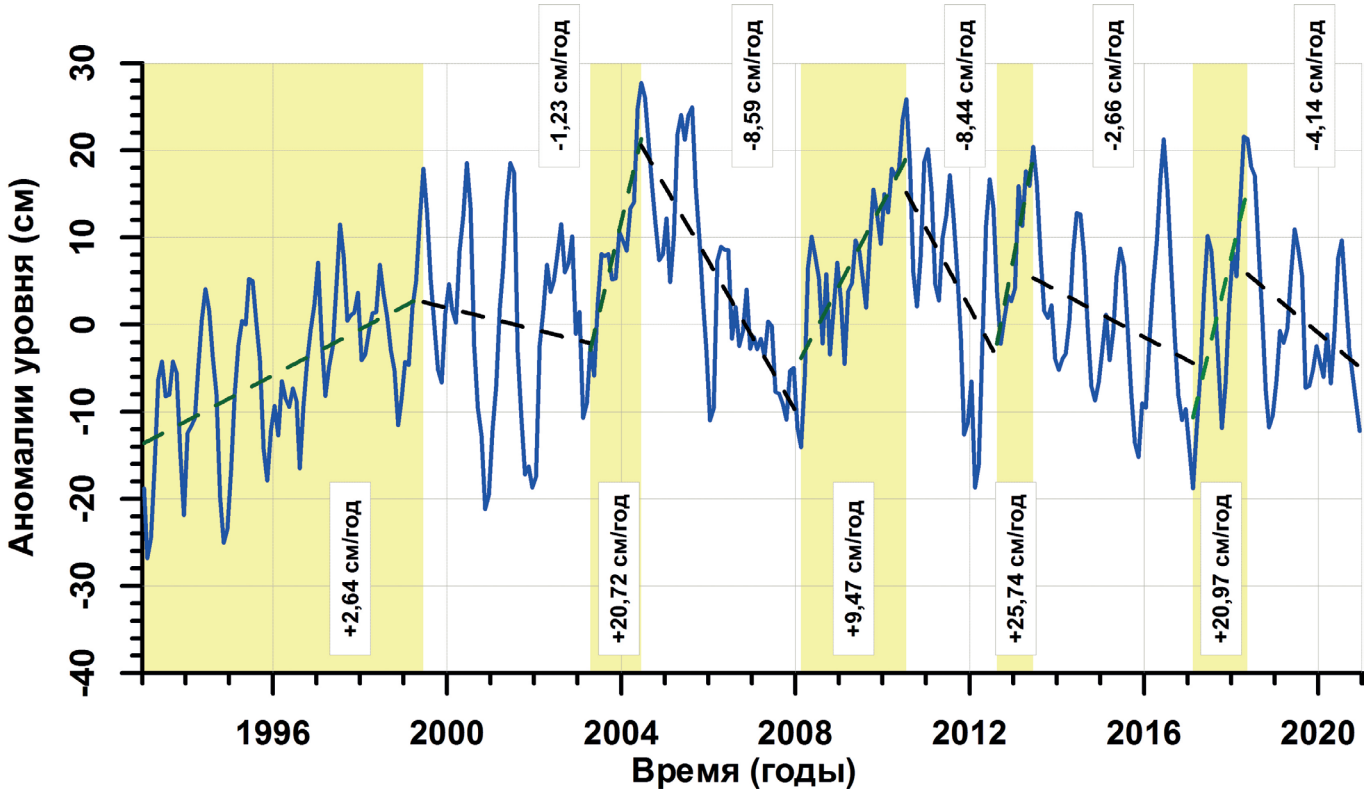



*Рис. 2.1.3.10 Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость аномалий уровня Черного моря (см) с января 1993 г. по декабрь 2020 г. по данным альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3*

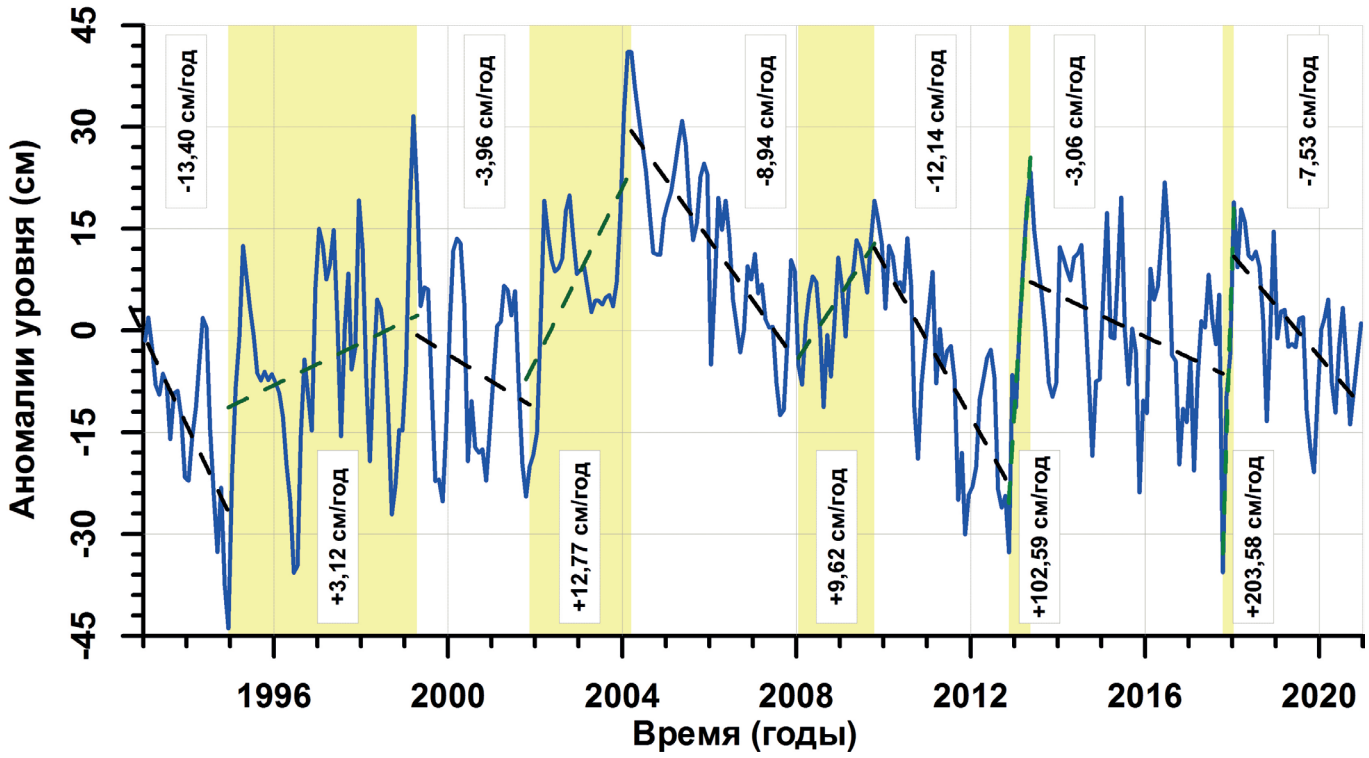



***Рис. 2.1.3.11*** *Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость аномалий уровня Азовского моря (см) с января 1993 г. по декабрь 2020 г. по данным альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3*

Средняя скорость повышения уровня Азовского моря с 1920-х гг. до 1985 г. составляла +0,24 см/год, а в период 1993-2012 гг. – +0,54±0,04 см/год (Костяной и др., 2014). Как и в Черном море, переход от повышения уровня моря (в среднем) к понижению, при чередующихся относительно коротких временных интервалах повышения и более длительных интервалах понижения уровня, произошел в 2004 г. (Гинзбург и др., 2021а) (рис. 2.1.3.11). Средняя за этот период скорость подъема уровня – +0,21±0,05 см/год. То есть линейный тренд подъема уровня в 1993-2020 гг. уменьшился примерно в 2,6 раза по сравнению с 1993-2012 гг. и практически сравнялся с трендом, зарегистрированным в период с 1920-х гг. до 1985 г. Таким образом, и в Черном, и в Азовском морях примерно с 2004 г. наблюдается постепенное понижение (в среднем) уровня моря. За 28 лет с 1993 по 2020 гг. уровень Черного моря поднялся примерно на 9 см, Азовского – примерно на 6 см.

Характер долговременной изменчивости уровня изолированного Каспийского моря существенно отличается от такового в Черном и Азовском морях. Рис. 2.1.3.12 (Гинзбург и др., 2021б) и предшествующие работы (Костяной и др., 2014; Лебедев, Костяной, 2016; Chen et al., 2017; Гинзбург, Костяной, 2018; Kostianoy et al., 2019 и др.), основанные на данных спутниковых альтиметров, дают представление о последовательном изменении уровня Каспия, начиная с 1993 г. За исключением двух периодов подъема уровня – с зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. со скоростью +19,93±2,14 см/год до отметки –26,4 м в Балтийской системе высот (БС) и с зимы 2001/2002 гг. до лета 2005 г. со скоростью +9,92 см/год до отметки –26,7 м БС – и его относительной стабилизации в 2015-2017 гг. (сла-

бый отрицательный тренд –0,37±0,12 см/год), уровень Каспия падал (рис. 2.1.3.12). Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993-2020 гг. составила –5,37±1,24 см/год. К концу 2020 года уровень достиг отметки –28,5 м, и от минимума 1977 г. (–29 м БС) его отделяет всего лишь 0,5 м. Следовательно, падение уровня превысило результаты долгосрочного прогноза, сделанные в ряде работ относительно уровня Каспия к 2020 г.: например, –26,6 ± 0,2 м в (Малинин, 2009), –27,6…–27,7 м в (Водный баланс, 2016). Сравнительный анализ характера изменения уровня Каспия и стока Волги в рассматриваемый период показывает, что подъем уровня в 1993-1995 гг. и его спад до 1997 г. соответствовали изменениям стока Волги (Гинзбург, Костяной, 2018). В дальнейшем определяющим фактором падения уровня моря, при падении в среднем речного стока, являлось, по-видимому, увеличившееся испарение с поверхности моря (Chen et al., 2017; Гинзбург, Костяной, 2018; Серых, Костяной, 2020).

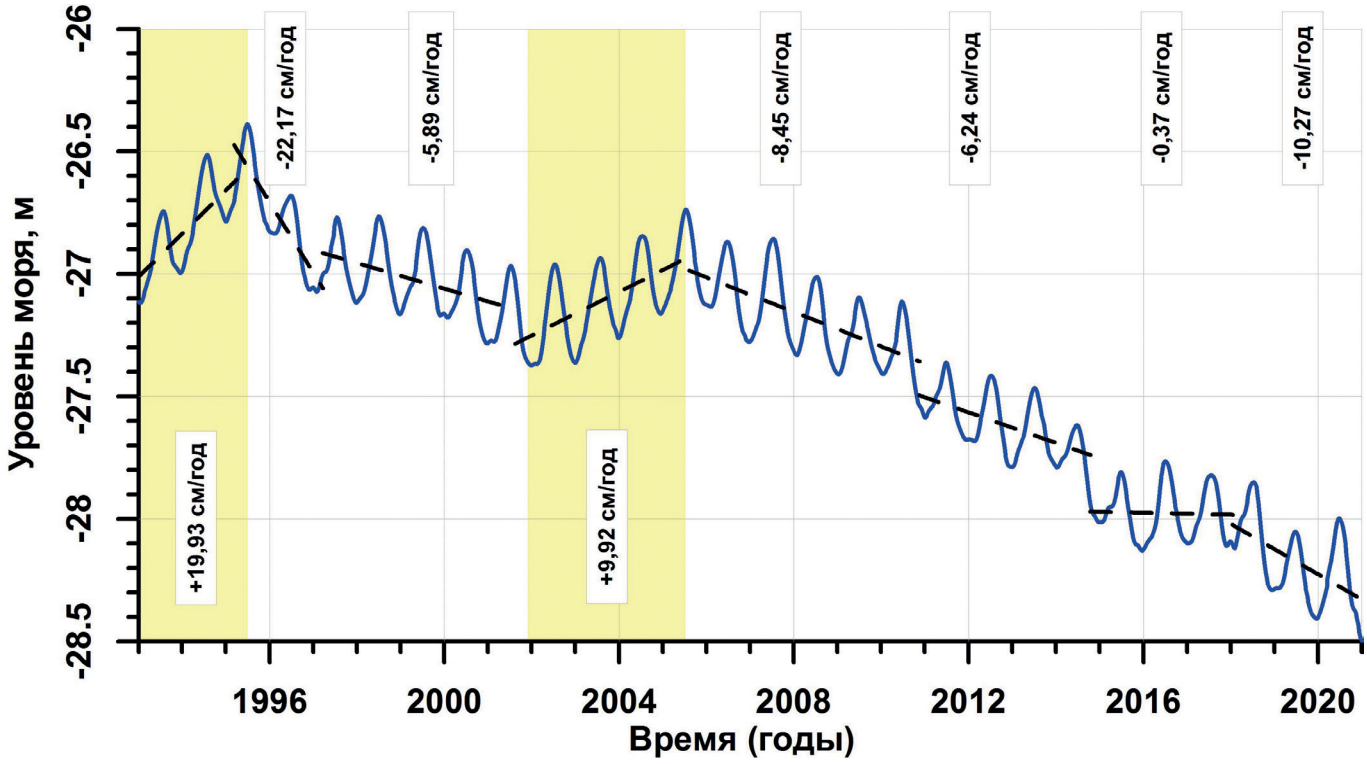



***Рис. 2.1.3.12*** *Уровень Каспийского моря (м) по данным альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3: сезонная (сплошная линия) и годовая (пунктир) с января 1993 г. по декабрь 2020 г. по данным альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3*

**Морской лед**

В Черном море лед появляется в основном на мелководном северо-западном шельфе, а в умеренные и суровые зимы – в небольшом количестве также в северо-восточном районе. Поскольку ледовитость северо-западной части моря хорошо согласуется с локальной ТВП (см. (Костяной и др., 2014)), то в 2000-е годы, при увеличении числа мягких зим (рис. 2.1.3.8а), можно ожидать соответствующего уменьшения ледовитости. Однако в суровые зимы площадь, покрытая льдом, существенно увеличивается. В суровую зиму 2011/2012 гг. море покрылось льдом в Керчи, Евпатории, Новороссийске, Одессе, Констанце (Костяной и др., 2014). За-

мерзли весь Одесский залив, Днепрово-Бугский лиман, мелководья у Румынии и Болгарии, Дунай; прекратилось судоходство по проливу Босфор; льдом сковало Керченский пролив (Гришин, 2012).

Наибольшая (из трех южных морей) ледовитость характерна для мелководного Азовского моря с меньшей по сравнению с Черным морем соленостью и меньшим теплозапасом. Средняя за зимний сезон ледовитость моря в 2000-2016 гг. (16%) была примерно вдвое меньше, чем в середине XX века (30%) (Дашкевич и др., 2016). В период 2005/2006-2015/2016 гг. наибольшая ледовитость наблюдалась в наиболее холодные зимы 2005/2006 и 2011/2012 гг. (примерно 32 и 36% соответственно), наименьшая – в мягкие зимы 2006/2007 и 2015/2016 гг. (менее 5%); толщина льда – примерно 22 см в эти холодные и 4 см в мягкие зимы.

Как следует из рис. 2.1.3.13а (Гинзбург и др., 2021а), в 2000-е годы увеличилось число зим с наибольшей среднемесячной ледовитостью менее 10%. Тренд ледовитости в период с 1980 по 2020 г. оказался отрицательным и равным –1,2%/10 лет. Наибольшая ледовитость в 2000-е годы наблюдалась в холодные зимы 2002/2003, 2005/2006, 2007/2008 и 2011/2012 гг. В феврале 2012 г. распространение южной границы ледяного покрова в Керченском проливе было наибольшим за все время наблюдений с 2000 г. В теплые зимы 2014/2015 и 2015/2016 гг., при практически отсутствовавших отрицательных температурах воздуха, только незначительный припай зарегистрирован вдоль косы Чушка и в Таманском заливе (Лаврова и др., 2017).

По приведенным в (Яицкая, Магаева, 2018) графикам, в период с 1950 до 2015 г. начало ледового периода в портах Азовского моря в среднем смещалось в сторону более поздних дат, а конец – в сторону более ранних. Средняя продолжительность ледового периода за эти годы, оцененная в (Гинзбург и др., 2021а) по приведенным в (Яицкая, Магаева, 2018) линейным трендам продолжительности ледового периода в Таганроге и Керчи, сократилась примерно на 1,5 месяца.

Тренд ледовитости в 1980-2020 гг. в Каспийском море был отрицателен и равен –0,8%/10 лет (Гинзбург и др., 2021б) (рис. 2.1.3.13б). По оценкам в (Ивкина и др., 2017), толщина льда с 1981/1982 до 2015/2016 гг. в среднем уменьшалась. Наименьшая за 22-летний период (1998-2019 гг.) продолжительность ледового периода (86 дней) отмечена в зиму 2015/2016 гг., наибольшая (147 дней) – в зиму 2011/2012 гг., средняя величина за этот период – 115 дней (Lavrova et al., 2019). Оценки продолжительности ледового периода для этих же зим в работе (Ивкина и др., 2017) дали, соответственно, 98 и 156 дней. В очень суровую зиму 2011/2012 гг. льдом покрылся не только весь Северный Каспий. Образование льда наблюдалось также вдоль западного побережья Среднего Каспия до Апшеронского полуострова и в мелководных заливах у восточного побережья Южного Каспия (заливы Туркменбаши и Южный Челекен) (Lavrova et al., 2019).

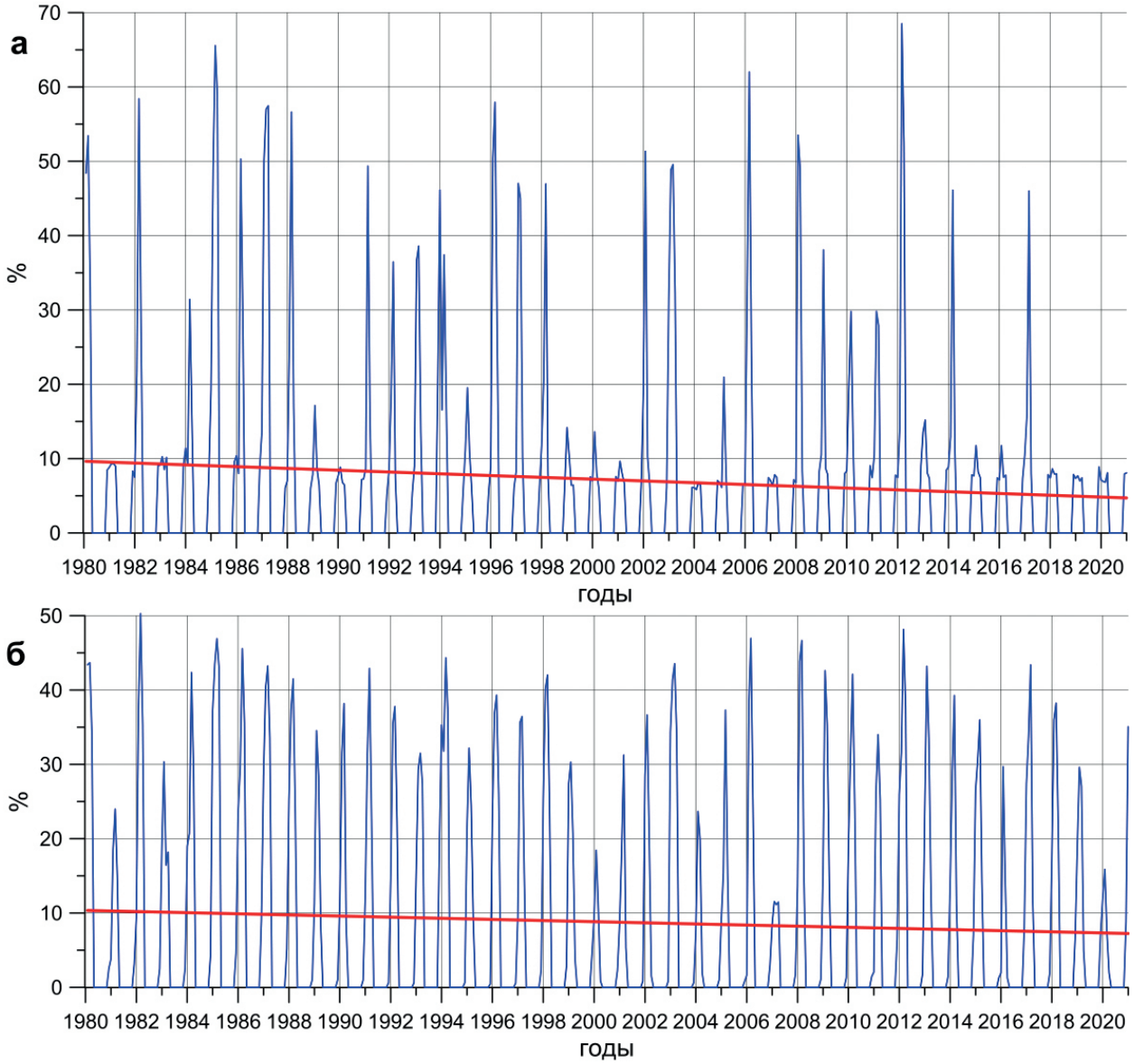



***Рис. 2.1.3.13*** *Изменения среднемесячной концентрации льда (синий цвет) и линейный тренд этих изменений (красный): а) в Азовском море, б) в северной части Каспийского моря*

В соответствии с работой (Ивкина и др., 2017), в период 1980-2016 гг. было две очень суровых зимы – 1993/1994 и 2011/2012 гг., восемь суровых – 1979/1980, 1981/1982, 1984/1985, 1987/1988, 1995/1996, 1997/1998, 2002/2003, 2007/2008 гг., девять мягких – 1980/1981, 1982/1983, 1988/1989, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2003/2004, 2006/2007 и 2015/2016 гг., остальные – умеренные. Для сравнения: в предшествующий период 1961-1979 гг. наблюдалось четыре очень суровых зимы (1966/1967, 1968/1969, 1971/1972 и 1976/1977 гг.), четыре суровых (1963/1964, 1970/1971, 1973/1974 и 1975/1976 гг.) и только одна мягкая (1963/1964 гг.) (Ивкина и др., 2017). Очевидно, что в 1980-е – 2000-е гг., по сравнению с периодом с 1962 г. до конца 1970-х гг., повторяемость очень суровых и суровых зим уменьшилась, а мягких и умеренных зим увеличилась (Ивкина и др., 2017). Согласно приведенным выше рис. 2.1.3.8б и 2.1.3.13б и оценкам в (Lavrova et al., 2019), зиму 2016/2017 гг. можно отнести к суровым, зимы 2017/2018 и 2018/2019 гг. – к умеренным. Зима 2019/2020 гг. была, очевидно, мягкой.

**Состояние экосистемы**

Мощным драйвером современных изменений экосистем Азовского и Черного морей являются инвазии чужеродных видов. Наиболее существенный ущерб экосистемам морей был нанесен в результате появления в 1980-х гг. пелагического хищника гребневика *Mnemiopsis leidyi*. Каждый год весной или в начале лета мнемиопсис заходит в Азовское море из Черного и дает вспышку численности, выедая зоопланктон. В результате биомасса зоопланктона со второй половины лета и до осени снижается до очень малых величин (в собственно море – до 5-10 мг/м$^3$, в среднем на два порядка ниже значений в период до вселения мнемиопсиса), что приводит к значительному ухудшению условий нагула для пелагических рыб (Гребневик, 2000; Студеникина и др., 2010). Кроме того, мнемиопсис способен потреблять икру и личинки пелагических видов рыб (Гребневик, 2000). Следствием этого вселения стал так называемый «коллапс» запасов и промысла хамсы, датируемый 1989-1992 гг. (Caddy, 2006). Как следствие, после вселения мнемиопсиса в южные моря России запасы основных видов пелагических рыб существенно снизились. Появление в конце 1990-х гг. в Черном и Азовском морях естественного врага мнемиопсиса – гребневика *Beroe ovata* sensu Mayer, 1912 (Konsulov, 1999) – уменьшило интенсивность развития мнемиопсиса (Шляхов, Гришин, 2009; Shiganova et al., 2019), но не решило проблему в полной мере.

После нескольких периодов распреснения в многоводные годы (1977-1983, 1986-1998, 2001-2006 гг.) (Алдакимова и др., 1977; Бронфман и др., 1979; Воловик, 1986), начиная с 2007 г. Азово-Черноморский рыбохозяйственный бассейн вступил в очередной цикл снижения материкового стока. Среднее годовое значение солености в собственно Азовском море повысилось с 9,6‰ в 2006 г. до рекордных величин 15,10‰ в 2020 г. Ареалы обитания полупроходных рыб (судака, леща, рыбца, тарани) с соленостью от 7 до 11‰ сократились до границ восточной части Таганрогского залива. Значительное сокращение зон с соленостью менее 13‰ (летальный уровень для личинок бычка) привели к резкому падению запасов азовских бычков. Рост солености привел к расширению акватории распространения в Азовском море мнемиопсиса, вплоть до района размножения тюльки, что также стало причиной сокращения ее запасов, а ухудшение кормовых условий в собственно море стало одной из причин падения запасов азовской хамсы.

Рост температуры вод в Черном море негативно сказался на состоянии запасов холодолюбивых видов, в том числе шпрота.

Таким образом, после 2011 г. численность базовых промысловых объектов Азовского и Черного морей (бычков, тюльки, азовской хамсы и шпрота) резко сократилась, что негативно сказалось на состоянии рыбодобывающих предприятий.

В бассейне Каспийского моря с конца 1970-х гг. прослеживается повышение средних годовых величин температуры воздуха, главным образом в результате интенсивного зимнего потепления (Катунин, 2014). Более высокая относительно нормы температура весной и осенью определяет более продолжительный период нагула полупроходных, морских и осетровых рыб в Северном Каспии в современный период (Катунин, 2014; Косарев, Тужилкин, 2000; Терзиев и др., 2002).

Уменьшение солености и повышение температуры воды в последние годы привели к снижению числа видов, приспособленных к высокой солености и низкой температуре, и, соответственно, увеличению доли тепловодных и мелкоразмерных форм планктона. Из зоопланктона Среднего Каспия исчезли веслоногие ракообразные *Limnocalanus grimaldii* и *Eurytemora grimmi*. Количественные характеристики планктона в последние десятилетия существенно не менялись.

В фауне Каспийского моря и низовьев впадающих рек в последние годы получают развитие теплолюбивые формы, включая вселенцев, ранее в современном ареале не встречавшихся. Так, среди организмов макрозоопланктона наблюдалось продвижение гребневика *Beroe ovata* в Средний Каспий, в опресненных водах низовьев Волги стали обычны креветки, среди непромысловой ихтиофауны продвигаются к северу рыба-игла, гамбузия и горчак.

В настоящее время нет оснований считать, что экосистемы южных морей способны адаптироваться к происходящим изменениям. Скорее всего, экосистемы Черного и Азовского морей по мере увеличения температуры воды и соответствующих перестроек состава и структуры сообществ перейдут в другое квазистабильное состояние, которое не будет тождественно нынешнему. Следует напомнить, что будучи входными границами самого активного инвазивного коридора – Понто-Каспийского, экосистемы Черного и Азовского морей уже несколько десятилетий находятся в состоянии трансформации, вызванной постоянными инвазиями чужеродных видов. Таким образом, сочетание сразу нескольких мощных драйверов изменения экосистем – инвазийного и климатического (потепление) – делает прогнозирование состояния морей (с последующим принятием эффективных управленческих решений) весьма непростой задачей, требующей значительного увеличения объема знаний. В качестве примера достаточно успешного проекта по сбору данных отклика морских экосистем на потепление, можно привести большой комплекс научно-исследовательских работ на Балтийском море, моделирующих состояние моря в 2100 г. Работы проводились в том числе in vivo, в мезокосмах, в которых задавались различные температурные условия и отслеживался комплекс параметров экосистемы в течении нескольких лет. Поскольку на Черном море подобных работ не проводилось ни в России, ни за рубежом, для оценки эффектов потепления на состояние экосистем в настоящее время нет достаточного количества входных данных.

**Ожидаемые изменения**

При сохранении определенного для периода 1980-2020 гг. тренда ТВП над Черноморско-Азовским регионом +0,53 °С/10 лет, к 2030 г. средняя ТВП может увеличиться на 0,53 °С, к 2060 г. – на 2,12 °С, к 2100 г – на 4,24 °С, над Каспийским регионом (тренд +0,30 °С/10 лет) – соответственно на 0,30, 1,2 и 2,4 °С. При этом ТПМ Черного моря (тренд +0,52 °С/10 лет) к 2030 г. может увеличиться на 0,52 °С, к 2060 г. – на 2,08 °С, к 2100 г. – на 4,16 °С, в Каспийском море (тренд +0,35 °С/10 лет) к 2030 г. – на 0,35 °С, к 2060 г. – на 1,4 °С, к 2100 г. – на 2,8 °С. Эти оценки возможного увеличения ТВП/ТПМ южных морей в общем согласуются с результатами модельных расчетов, приведенных в докладе IPCC (IPCC, 2013; The Ocean, 2020): в зависимости от сценария антропогенного выброса парниковых газов в атмосферу, к 2100 г. глобальное потепление не превысит 2,5 °С или достигнет 4 °С. Как поведет себя температура воздуха/воды в юж-

ных морях в последующие годы, покажут дальнейшие наблюдения. Пока можно констатировать, что прогноз в (Бухарицин, Андреев, 2006) зим холоднее нормы в 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 и 2015/2016 гг. в Северном Каспии не оправдался. Не оправдалось и предположение в (Думанская, 2011) о возможности наиболее тяжелой ледовой обстановки в Азовском море в зиму 2018/2019 гг.

Средние для 1993-2020 гг. скорости подъема уровней Черного (+0,32±0,16 см/год) и Азовского (+0,21±0,05 см/год) морей заметно уменьшились по сравнению с периодом 1993-2012 гг. из-за тенденции понижения уровней (в среднем) после 2004 г. Тренд уровня Черного моря приблизился к средней скорости роста уровня Мирового океана (+3,6 мм/год в 2006-2015 гг. (The Ocean, 2020)), а в Азовском море оказался меньше нее. При сохранении существующих тенденций уровни Черного и Азовского морей к 2030 г. теоретически могут вырасти примерно на 3,2 см и 2,1 см, к 2060 г. – на 12,8 см и 8,4 см, и к 2100 г. – на 25,6 см и 16,8 см соответственно.

Уровень изолированного Каспийского моря продолжает падать. К концу 2020 года уровень достиг отметки –28,5 м, и от минимума 1977 г. (–29 м БС) его отделяет всего лишь 0,5 м. Наибольшие прогнозируемые понижения уровня с 2020 г. до конца столетия дают результаты моделирования в работе (Nandini-Weiss et al., 2020): 9 и 18 м или 8 и 16 м для сценариев антропогенного выброса парниковых газов в атмосферу RCP4.5 и RCP8.5 соответственно. При падении уровня на 9 или 18 м поверхность Каспия уменьшится на 23 или 34% (Prange et al., 2020).

Выявлены существенные расхождения оценок выхода на безледный режим Каспийского моря по экстраполяции тренда фактических значений толщины морского льда и по оценкам климатических моделей. Анализ трендов показывает, что уменьшение толщины морского льда будет происходить более быстрыми темпами. Так, практическое отсутствие льда будет наблюдаться для станций центрального Каспия (Форт-Шевченко, Кулалы) уже к 2035 г., а к 2055 г. лед практически исчезнет уже во всех пунктах, кроме северо-востока (Пешной и Атырау). Зимы к концу XXI века перейдут в основном в разряд мягких и очень мягких, устойчивый ледяной покров сохранится лишь в северо-восточной части моря. Повторяемость безледных зим увеличится в 8-10 раз, граница открытой воды сместится на север и будет проходить по линии о. Тюлений – Форт-Шевченко (Лобанов, Наурозбаева, 2021).

### 2.1.3.4 Дальневосточные моря

**Температура воздуха**

Одним из основных факторов, определяющих погодные условия на дальневосточных морях России, является муссонный тип атмосферной циркуляции. Индекс муссонной циркуляции (рис. 2.1.3.14) рассчитан по полям реанализа NCEP/NCAR как стандартизованная разность атмосферного давления между смежными участками суши и моря. Для характеристики летней фазы (май – август) выбраны районы климатического положения северного отрога Тихоокеанского антициклона и Амурской депрессии (рис. 2.1.3.14а). Для зимы (декабрь – март) использованы примерно эти же районы, но занятые в холодное полугодие барическими полями противоположного знака – между отрогом Азиатского антициклона и областью циклогенеза над северо-западной частью Тихого океана (рис. 2.1.3.14б).

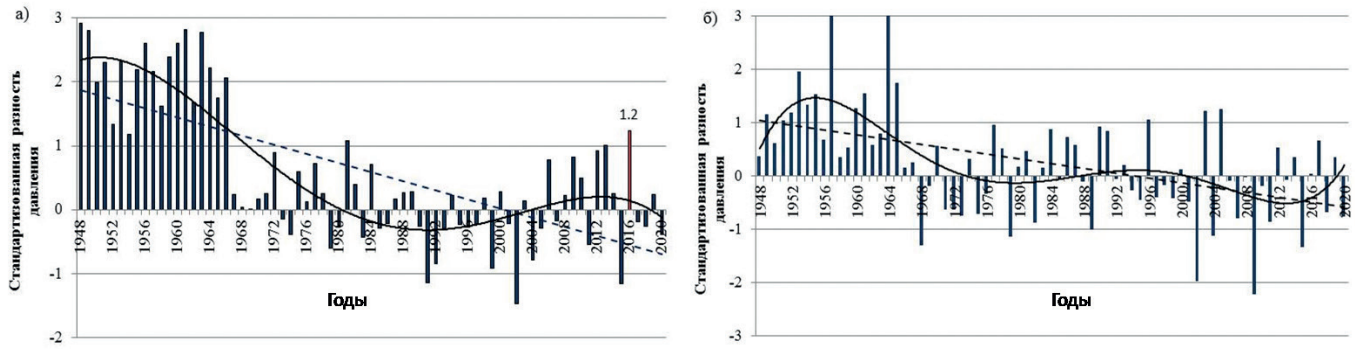



***Рис. 2.1.3.14*** *Многолетний ход индекса муссонной циркуляции для дальневосточного побережья – стандартизованная разность атмосферного давления «суша – море» для (а) летней и (б) зимней фазы муссона. Показаны линейный тренд (пунктир) и полиномиальный тренд пятой степени (сплошная линия). (Мезенцева, Федулов, 2017а, с дополнениями авторов)*

Начиная с конца 1960-х гг. летняя муссонная циркуляция над прибрежными районами Дальнего Востока продолжительное время была относительно слабой (Ding et al., 2010; Шатилина, Анжина, 2011; Плотников и др., 2015; Sooraj et al., 2015; Mezentseva, Soloveva, 2019). В конце 2000-х гг. ее активность вновь возросла, но не достигла состояния середины прошлого века (рис 2.1.3.14а). Летние сезоны 2012 и 2013 гг. можно считать началом периода обострения летнего муссона. Амурская и азиатская депрессии и, следовательно, интенсивность выноса воздуха с моря на сушу приобрели черты, характерные для этих явлений в 1950-60-е гг. (Мезенцева и др., 2015). Зимняя циркуляция над Дальним Востоком и прибрежными акваториями с середины 1960-х гг. также перешла в фазу относительной деградации (рис. 2.1.3.14б) (Глебова, 2011; Плотников и др., 2015; Мезенцева, Федулов, 2017а). Устойчивых тенденций к ее обострению не наблюдалось вплоть до сезона 2019-2020 гг. (ДВНИГМИ, 2020).

Вслед за ослаблением муссонной циркуляции на акваториях дальневосточных морей в конце 1980-х гг. наметилась устойчивая тенденция ослабления ветра (Мезенцева, Федулов, 2017б). Однако в последнее десятилетие, начиная с 2013 г., над акваториями Японского и Охотского морей наблюдается рост числа штормов (скорость ветра 17 м/с и более) и их интенсивности в летне-осенний период, что объясняется активностью циклонов тропического происхождения (Мезенцева и др., 2019).

Температура воздуха в приземном слое над дальневосточными морями в целом сохраняет многолетнюю тенденцию к росту (Ростов и др., 2016а, б, 2017, 2018а, б, 2020, 2021б; Ростов, Дмитриева, 2021б; Гайко, 2019; Хен и др., 2021, 2022). Анализ среднегодовой температуры воздуха (*Ta*) над дальневосточным бассейном (42-60° с.ш., 135-170° в.д.), где сосредоточены основные районы российского промысла морских водных биоресурсов, по данным реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2020 г. (NOAA, 2020) проведен в работе (Хен и др., 2022) (рис. 2.1.3.15). До 1970 г. *Ta* постепенно понижалась со скоростью 0,1°C/10 лет и достигла минимума 0,9 °C во второй половине 1960-х гг. В начале периода потепления в 1980-е гг. ее скорость составила 0,1 °C/10 лет, затем темп увеличился до 0,3 °C/10 лет на стыке тысячелетий. В первой половине 2010-х гг. *Ta* достигла

максимальных значений (2,1°С), а в последнее пятилетие понизилась до 1,9 °С. В целом в последние 15 лет (2006-2020 гг.) наметилась стабилизация *Та* без значимого тренда ни в сторону потепления, ни в сторону похолодания.

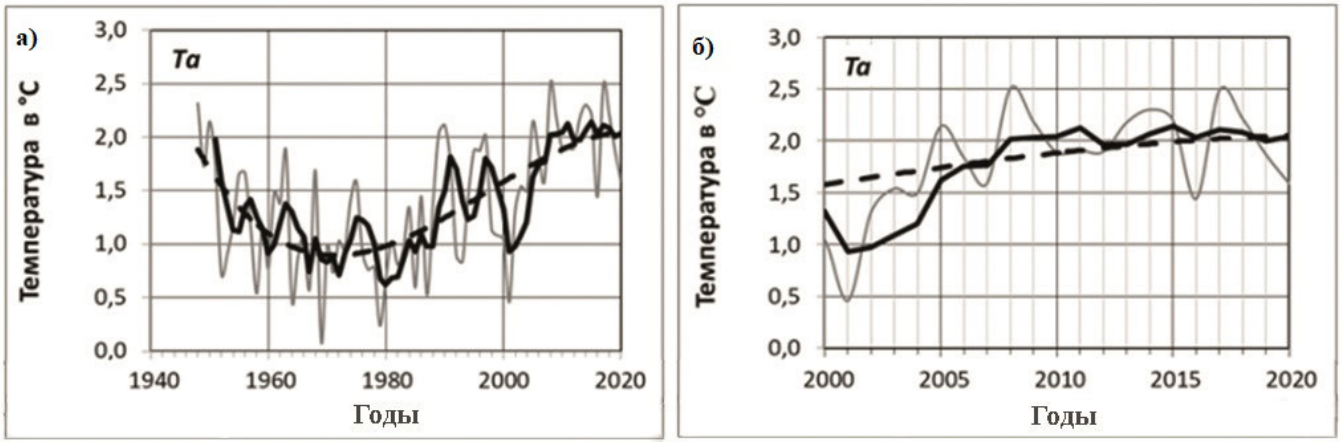



***Рис. 2.1.3.15*** *Многолетняя изменчивость температуры воздуха над дальневосточным бассейном (Та) за период 1948-2020 гг. (а) и 2000-2020 гг. (б). Тонкая серая линия – ежегодные значения; жирная линия – четырехлетнее скользящее среднее; пунктир – полиномиальный тренд четвертой степени (Хен и др., 2022)*

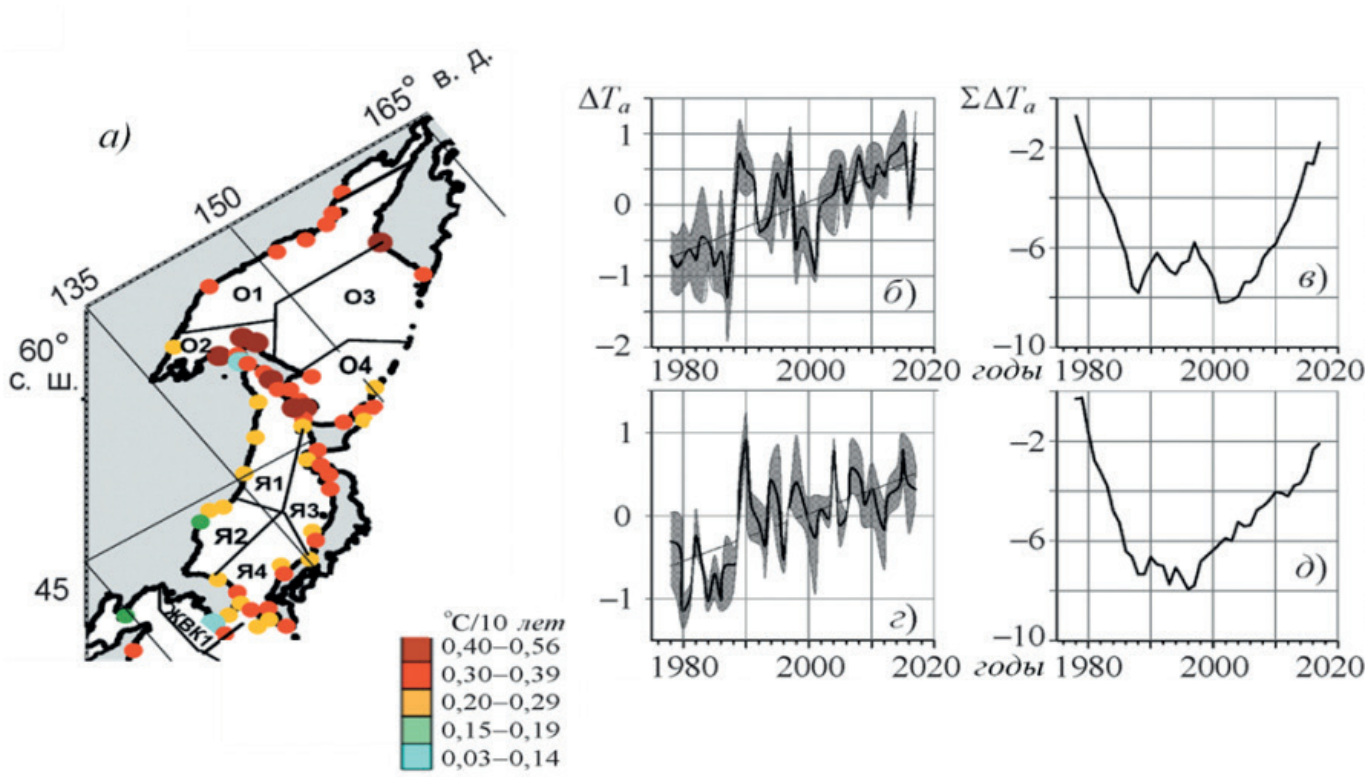



***Рис. 2.1.3.16*** *Тренды среднегодовых значений температуры воздуха Та на прибрежных станциях Японского и Охотского морей (а), межгодовая изменчивость аномалий ΔТа (б, г) и накопленных аномалий ∑ Δ Та (в, д) на этих станциях в Охотском (б, в) и Японском (г, д) морях. Показан диапазон внутригодовых колебаний ΔТа (серый тон) и линия линейного тренда (Ростов и др., 2020)*

По данным прибрежных метеостанций за период с 1978 по 2019 г. положительные тренды среднегодовой температуры воздуха составили 0,29 °С/10 лет в Японском и 0,35 °С/10 лет в Охотском морях (рис. 2.1.3.16) (Ростов и др., 2020). Это несколько выше трендов, оцененных за период 1930-2019 гг. на прибрежных метеостанциях юга Приморского края (Японское море), составивших 0,17-0,27 °С/10 лет (Гайко, 2019), что обусловлено усилением роста *Та* в конце прошлого века.

**Температура воды**

В период 1950-2020 гг. многолетние изменения температуры поверхности моря (ТПМ) во всех дальневосточных морях России протекали по сходному сценарию (рис. 2.1.3.17). Во все сезоны года температура воды повышалась, при этом зимой и осенью тренды выражены наиболее ярко, а летом они менее показательны (Хен и др., 2022). В Охотском и Беринговом морях скорость роста температуры составляет около 0,17 °С/10 лет, а в Японском несколько ниже 0,10-0,13 °С/10 лет.

Более высокая скорость роста среднегодовой ТПМ наблюдается в последние десятилетия (рис. 2.1.3.18). Так, в Японском море она составляет 0,24 °С/10 лет, а в Охотском – 0,20 °С/10 лет. При этом наибольшее потепление отмечается в летний сезон и составляет, соответственно, 0,34 и 0,44 °С/10 лет, в то время как зимние тренды значительно меньше (0,21 и 0,08 °С/10 лет), особенно для Охотского моря (Ростов и др., 2020; Ростов, Дмитриева, 2021а).

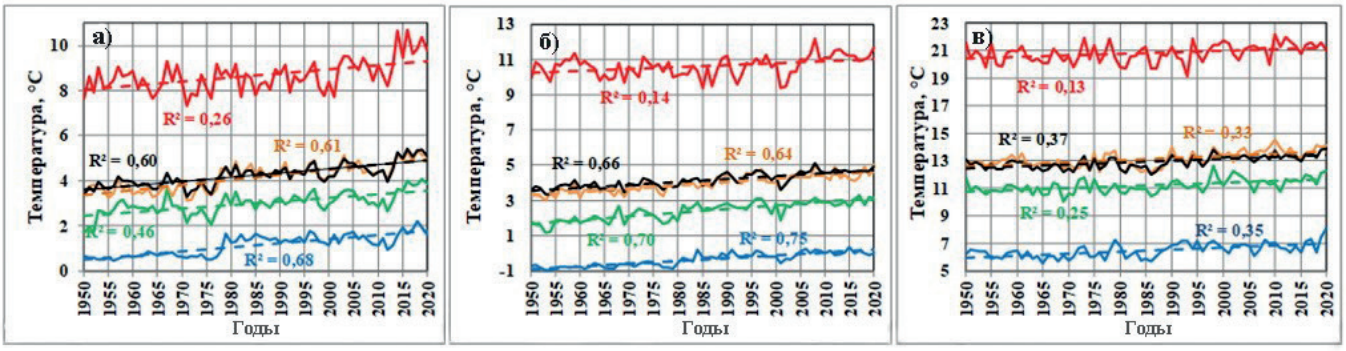



***Рис. 2.1.3.17*** *Многолетние изменения ТПМ (а) Берингова, (б) Охотского и (в) Японского морей зимой (синяя кривая), весной (зеленая), летом (красная) и осенью (коричневая). Черная кривая – среднегодовая температура; пунктирные линии – линейные тренды, $R^2$ – коэффициент достоверности аппроксимации (Хен и др., 2022 с дополнениями)*

Анализ изменений ТПМ за более длительный период показывает меньшую скорость потепления поверхностных вод. По данным Японского метеорологического агентства, ТПМ вокруг Японии возрастала за период 1900-2019 гг. со средней скоростью 1,16 °С/100 лет, что значительно превышает средние тренды по Мировому океану и северной части Тихого океана (0,55 °С и 0,53 °С/100 лет соответственно). При этом наиболее быстрый рост ТПМ отмечается в центральной части Японского моря, где он составляет 1,75 °С/100 лет (JMA, 2021).

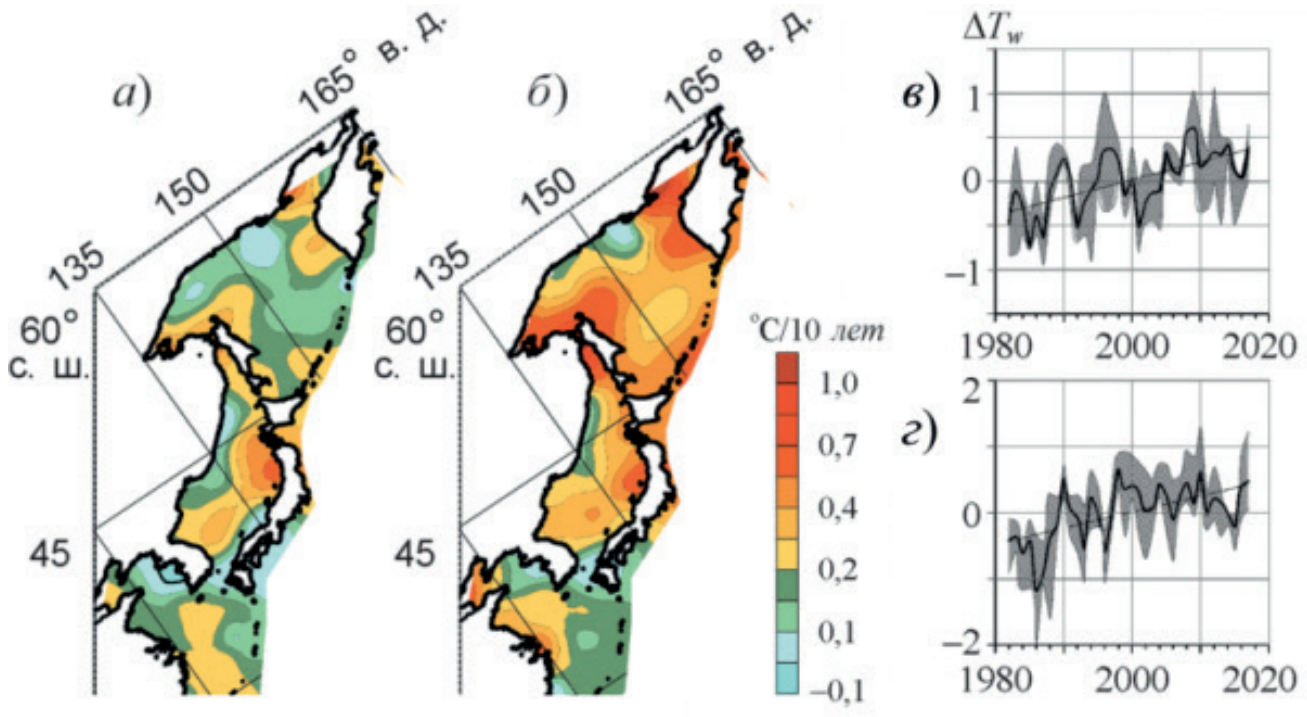



***Рис. 2.1.3.18*** *Пространственные изменения трендов среднегодовых аномалий ТПМ (а), трендов ТПМ в теплый сезон (б) и межгодовая изменчивость аномалии ТПМ в Охотском (в) и Японском (г) морях в 1982-2018 гг. (Ростов и др., 2020)*

В целом за период 1950-2020 гг. во всех трех морях отмечались заметные климатические сдвиги, причем только в сторону потепления (Хен и др., 2022). Первый масштабный скачок ТПМ произошел в 1977 г. в Беринговом море. За последние годы наиболее существенный сдвиг произошел в Беринговом море в 2014 г. Это событие тесно связано с аномальным развитием атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана зимой 2013-2014 гг. (Хен и др., 2019).

Анализ изменения температуры толщи вод Охотского и Берингова морей показывает отсутствие статистически значимых линейных трендов и наличие долговременных циклов, включающих периоды потепления и похолодания, продолжительностью около 30 лет. Так, с 2009 г. отмечается рост теплосодержания холодного промежуточного слоя Охотского моря (Лучин, Матвеев, 2016). В Беринговом море также прослеживаются циклические колебания теплосодержания холодного промежуточного слоя и положительный тренд теплосодержания теплого промежуточного слоя (рис. 2.1.3.19), что является следствием адвекции тихоокеанских вод (Басюк, 2011; Luchin et al., 2009; Matishov et al., 2014a).

В Японском море следствием отмеченного выше снижения интенсивности зимнего муссона является ослабление конвекционных процессов и соответственно вертикального перемешивания вод. В результате уменьшаются потери тепла, обусловленные конвекцией, и донные воды постепенно нагреваются за счет геотермального потока, и одновременно происходит снижение содержания растворенного кислорода (Yoon et al., 2018). На рис. 2.1.3.20 представлено изменение температуры воды, полученное по результатам программы CREAMS и других наблюдений ТОИ ДВО РАН с 1995 по 2020 г. От-

мечается уменьшение скорости роста температуры донных вод с 0,0018 °С/год за весь период наблюдений (1995-2020 гг.) до 0,0016 °С/год за последние 10 лет (Лобанов и др., 2021).

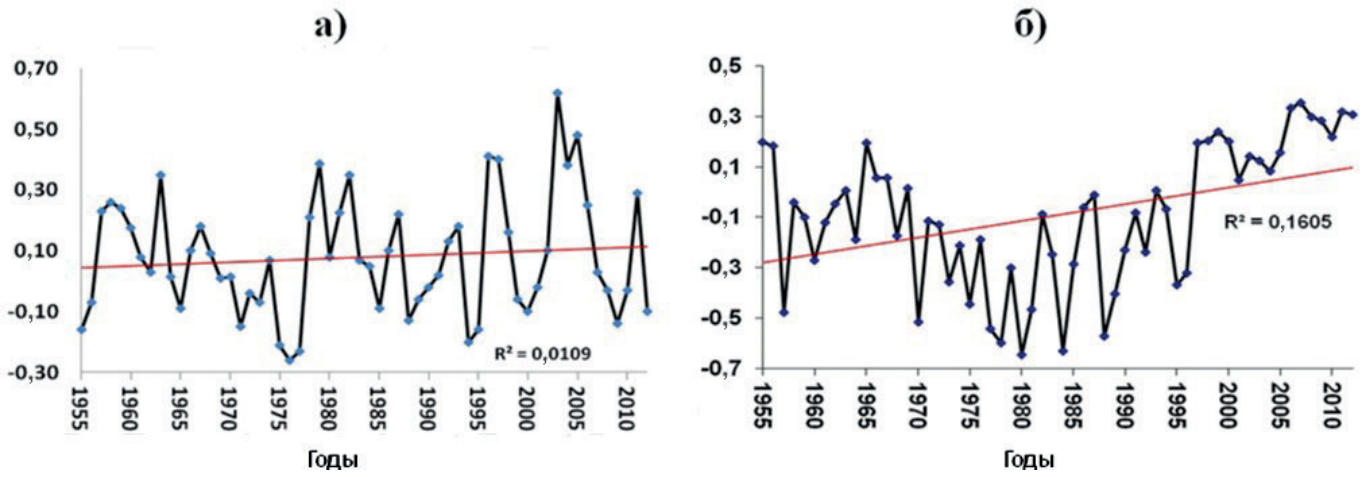



***Рис. 2.1.3.19*** *Межгодовые изменения нормированных аномалий интегрального содержания тепла в холодном (а) и теплом (б) промежуточных слоях Берингова моря (Matishov et al., 2014a)*

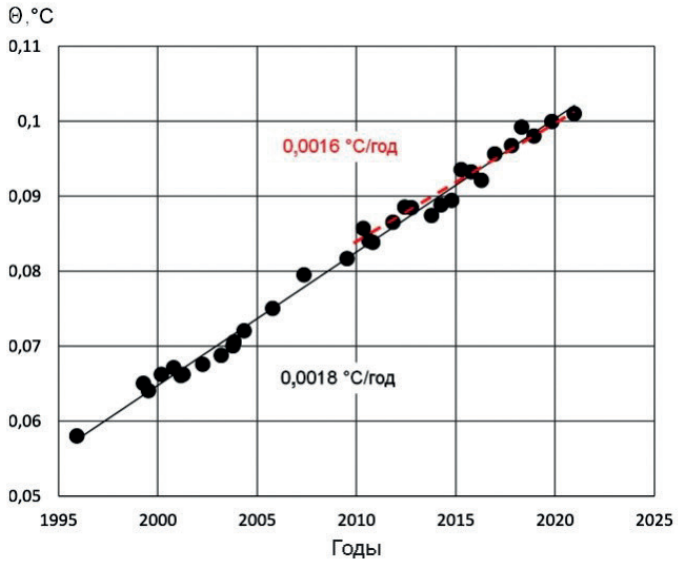



***Рис. 2.1.3.20*** *Межгодовая изменчивость потенциальной температуры воды (°С) в придонном слое 2900-3600 м Центральной котловины Японского моря (Лобанов и др., 2021)*

**Морской лед**

Оценка современного состояния ледяного покрова дальневосточных морей и последних изменений ледовитости выполнена на основе пополняемой климатологической базы ежедекадных данных с 1957-1960 гг. (Хен и др., 2011). Среднезимняя ледовитость рассчитывалась как среднее за январь – апрель. Для Охотского моря для марта, месяца максимального сезонного развития ледяного покрова, сформирован более длинный временной ряд с использованием данных А. Н. Крындина (1964) за 1929-1956 гг.

Тенденции многолетнего хода ледовитости дальневосточных морей по сравнению с предыдущими оценками (Лобанов и др., 2014)

существенно не изменились. По-прежнему общий линейный тренд на снижение среднезимней ледовитости для исторического ряда наблюдений статистически значим (> 99%) только в Охотском море (3,1%/10 лет в период 1957-2020 гг.). Для периода 1929-2020 гг. тренд ледовитости в марте составил 1,8%/10 лет (рис. 2.1.3.21). В Беринговом море и Татарском проливе тренды остаются статистически незначимыми. Пищальник и др. (2019), выполнив реконструкции временных рядов ледовитости Охотского моря и Татарского пролива с 1882 г., обнаружили, что скорость общего уменьшения площади ледяного покрова за 137 лет в Татарском проливе в два раза ниже, чем в Охотском море.

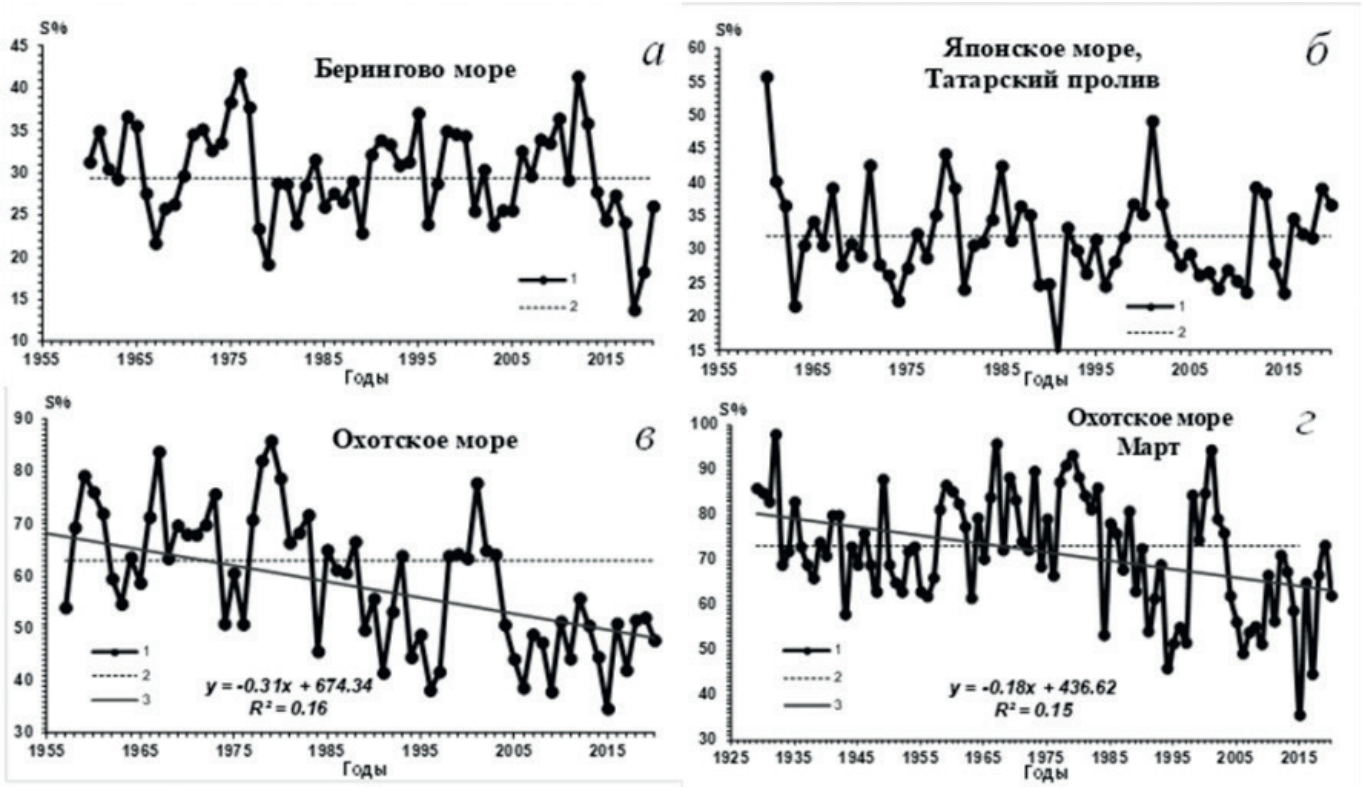



***Рис. 2.1.3.21*** *Среднезимняя ледовитость Берингова (а), Японского (б) и Охотского (в) морей и ледовитость Охотского моря в марте (г). 1 – ежегодные значения; 2 – среднемноголетнее; 3 – значимый на 99% уровне линейный тренд (Ustinova, Sorokin, 2013, с дополнениями авторов)*

Однако в последние годы наблюдались существенные изменения ледяного покрова в Беринговом море. Здесь произошло резкое снижение ледовитости после суровой зимы 2011-2012 гг. до нового исторического абсолютного среднезимнего минимума в 2018 г. (13,8%). Абсолютные минимумы ледовитости были перекрыты в каждом из месяцев зимы 2017-18 гг. (Басюк, Зуенко, 2019). Экстремально малоледовитые условия сформировались на фоне тенденции к потеплению, наблюдаемой в Беринговом море с 2014 г., однако 2018 год был исключительным даже на этом фоне, что проявилось и в других гидрометеорологических показателях (Basyuk, Zuenko, 2020).

В Охотском море, начиная с 2004 г. ледовитость остается значительно ниже нормы. Такого длительного периода малоледовитых зим ранее не отмечалось. Абсолютный минимум среднезимней ледовитости был обновлен в 2015 г., и теперь он составляет 34,8%. Абсолютного

минимума за 92-летний период наблюдений достигла и ледовитость в марте (рис. 2.1.3.21). В этот ледовый сезон было зафиксировано минимальное значение ледовитости и с учетом реконструированных данных за период с 1882 по 2015 г. (Пищальник и др., 2016). В отличие от Берингова и Охотского морей, в Японском море (Татарский пролив) не был обновлен исторический минимум ледовитости. Напротив, в отдельные годы отмечались значения выше нормы.

**Уровень моря**

Анализ долгосрочных изменений уровня Японского моря на основе спутниковых альтиметрических данных проекта Коперник (Copernicus Marine Service) за 1993-2020 гг. показывает положительные линейные тренды практически на всей акватории моря в среднем около 3,6 мм/год, что несколько больше средней величины для Мирового океана 3,42 мм/год (AVISO, 2021). Повышение уровня является более значительным в районах Цусимской котловины в юго-западной части моря и в районе котловины Ямато в юго-восточной части, где тренды достигают 7 и 6 мм/год соответственно.

На фоне тренда отмечаются квазидвухлетние (Hirose, Ostrovskii, 2000; Трусенкова, Каплуненко, 2013) и десятилетние (Kang et al., 2005; Трусенкова, 2018) колебания, хорошо заметные при разложении аномалий уровня моря на эмпирические ортогональные функции. При этом в 1994-2001 и 2008-2016 гг. наблюдался синфазный подъем уровня Японского моря (положительные фазы), в 2002-2007 гг. происходило слабое снижение (отрицательная фаза). С положительной фазой 1995-2000 гг. связана тенденция увеличения расхода воды, поступающей в Японское море через Корейский пролив, а с отрицательной – тенденция уменьшения расхода (Yoon et al., 2016). Подъем уровня моря был наиболее интенсивным в первую положительную фазу (1994-2001 гг.) до 5-10 см на большей части акватории и на 15-20 см в районах котловин Цусимской и Ямато. Во вторую положительную фазу (2008-2016 гг.) подъем в субарктической части моря (к северу от 40° с.ш.) был близок к произошедшему в 1994-2001 гг., но в субтропической части моря он был слабее, а в зоне 38°–39,5° с.ш. (к западу от 133°–135° в.д.) произошло опускание уровня моря (до 10 см). В отрицательную фазу (2002-2007 гг.) изменения уровня в субарктической части моря были незначительны, а в субтропической части произошло опускание более чем на 2,5 см, в некоторых районах – на 5 см, в районах котловин Ямато и Цусимской – до 15 и 20 см соответственно.

В большинстве районов Охотского моря по данным прибрежных метеостанций за 1980-2016 гг. наблюдался положительный линейный тренд уровня моря до 2,1-3,6 мм/год, что соответствует оценкам для Мирового океана в среднем. Наибольшие скорости отмечались в области о. Хоккайдо и Южных Курил в зоне влияния вытекающего из Японского моря течения Соя. Влияние колебаний стока Амура прослеживалось только на сравнительно небольшом расстоянии, у северо-восточного побережья о. Сахалин (Ростов и др., 2018б). По данным спутниковой альтиметрии за 1993-2020 гг. тренды уровня Охотского моря положительны и довольно однородны по акватории, составляя в среднем 3,0 мм/год; тренды уровня Берингова моря положительны, составляя 2-2,5 мм/год и 2,5-3,5 мм/год в юго-западной и в северо-западной частях моря соответственно.

**Состояние экосистемы**

Потепление вод дальневосточных морей России, продолжающееся на протяжении последних 30 лет, оказало сильное влияние на морские экосистемы. У одних видов биоценоза, как, например, лососей, резко повысилась численность, а у других видов пошла на убыль. Одним из наблюдаемых последствий потепления стала миграция тропических и субтропических видов хрящевых рыб (акул, скатов, химер) в нехарактерные для них воды, омывающие Южные Курилы и Сахалин (Охотское и Японское моря) (Dyldin, Orlov, 2021). В прибрежных водах Сахалина достоверно отмечается уже более 40 видов этих рыб. Из них к тропическим и субтропическим мигрантам можно отнести плоскоголовую семижаберную акулу *(Notorynchus cepedianus)*, китовую акулу *(Rhincodon typus)*, обыкновенную морскую лисицу *(Alopias vulpinus)* и молочную акулу *(Rhizoprionodon acutus)*.

Современные изменения в макроэкосистеме Охотского и Японского морей соответствуют концепции перестройки субполярных экосистем под влиянием потепления климата в направлении уменьшения продуктивности при увеличении эффективности их функционирования (Зуенко, 2009; Зуенко и др., 2019). Так, мощность весеннего «цветения» планктона в Охотском море резко снизилась в 2000-е годы и остается на низком уровне, что является естественным следствием ослабления конвекции и связанного с этим уменьшения круговорота биогенных элементов, при этом среднегодовые величины концентрации хлорофилла у поверхности моря практически не меняются (Зуенко и др., 2019). Общая биомасса зоопланктона в 2000-е гг. резко сократилась и продолжает уменьшаться, хотя биомасса крупноразмерных видов в последние годы начала расти.

В то же время, динамика запасов массовых видов рыб и беспозвоночных не обнаруживает связи с изменениями кормовых условий. Для большинства видов она определяется изменениями условий воспроизводства, при этом реакция на них специфична для каждого вида и зависит от особенностей процесса репродукции; численность популяции наиболее массового вида рыб – минтая, регулируется внутрипопуляционными механизмами, ряд долгоживущих видов показывают стабильность запасов безотносительно изменений условий среды.

Динамика численности трех основных видов промысла тихоокеанских лососей России (горбуши, кеты и нерки) тесно связана с изменчивостью средней годовой температуры воздуха (*Ta*) над дальневосточным бассейном России (Хен и др., 2021). Общим для *Ta* и численности лососей является спад с конца 1940-х гг. до середины 1970-х гг., затем имеет место резкий подъем с начала 1980-х гг. по настоящее время. Так, наряду с понижением температуры воздуха в начале 2000-х гг., связанным с действием Ла Ниньо на рубеже тысячелетий (Glantz, 2002), произошло падение численности горбуши, кеты и нерки. Последующее резкое потепление, проходившее в течение первого десятилетия XXI столетия, спровоцировало ускорение темпов увеличения численности лососей, что привело к рекордному вылову (677 тыс. т) в 2018 г.

В середине 2000-х гг. температура воздуха стабилизировалась и до 2019 г. держалась на среднем уровне 2,0-2,2 °C. В этот период отмечались два пика вылова горбуши – в 2009 г. (424 тыс. т) и 2018 г. (511 тыс. т). Численность кеты и нерки в середине 2010-х гг. достигла своего пика, а в последние годы наметился её спад. Особенно сильное падение выловов всех трех видов лососей произошло в 2020 г.

Важным проявлением воздействия межгодовых региональных изменений температуры на морские экосистемы, по-видимому, является и катастрофическое заморное явление у юго-восточного побережья Камчатки, отмечавшееся в сентябре 2020 г., причиной которого могло быть значительное повышение температуры воды в летний сезон, определившее интенсивное развитие планктона, в том числе и его токсичных видов, вызвавших массовое отравление морских организмов (Пичугин и др., 2020).

**Ожидаемые изменения**

Прослеживая тенденции в многолетнем ходе индексов атмосферной циркуляции, в частности, усиление южной компоненты межширотного обмена, можно с высокой вероятностью предполагать, что в ближайшие годы вклад муссонной циркуляции в летние процессы в Восточной Азии, в том числе над дальневосточными морями, будет доминирующим. Сохранится высокая вероятность выхода в регион тропических циклонов и, как следствие, высокие повторяемость и интенсивность штормов в летне-осенний период. В холодное полугодие также можно ожидать возврата фазы обострения зимней муссонной циркуляции (вероятно, на более низком уровне развития по сравнению с 1950-1960-ми гг.) и усиления циклонической деятельности над северо-западной частью Тихого океана с высокой повторяемостью штормов. Проведенный анализ межгодовых изменений характеристик дальневосточных морей показывает, что они происходят практически синхронно и однонаправленно с изменениями глобальной климатической системы (IPCC, 2021), но с более высокой скоростью, особенно в северной части региона. Модельные расчеты, сделанные для Японского моря, исходя из современных тенденций глобального потепления и наблюдаемого объема среднегодового переноса вод Цусимским течением, без учета других факторов, прогнозируют рост поступления теплых вод из Восточно-Китайского моря и положительных аномалий среднегодового теплосодержания вод Японского моря (Choi et al., 2013). Однако эти оценки относятся к водам Кореи и Японии в южной части моря в зоне влияния Цусимского течения.

На основе численных экспериментов с четырьмя региональными климатическими моделями с высоким пространственным разрешением (0,05°) были получены оценки возможного подъема уровня в Японском море в период с 2006 по 2100 г. (Kim et al., 2021). В среднем уровень моря может повыситься на 47 и 67 см в условиях сценариев с умеренным и с высоким уровнем эмиссии парниковых газов, соответственно, как за счет потепления (повышения температуры воды), так и за счет усиления вихреобразования в зоне теплых течений южной части моря. Что касается Охотского и Берингова морей, авторам неизвестны подобные оценки на основе региональных моделей высокого разрешения. Однако согласно оценкам, основанным на расчетах глобальных моделей CMIP5 (Church et al., 2013), подъем уровня Охотского и Берингова морей может составить, в условиях сценариев с различным уровнем эмиссии парниковых газов, 30-60 см к периоду 2081-2100 гг. в сравнении с базовым периодом 1986-2005 гг.

Наблюдаемые изменения климата проявляются не только в повышении температуры воздуха и воды, росте уровня моря, уменьшении площади ледяного покрова, но также и в увеличении частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений, таких как, например, выходы в регион тропических циклонов или формирование волн тепла. Последние впервые

отмечались в северо-западной части Японского моря летом 2018 и 2021 гг., когда температура воды в заливе Петра Великого превышала 28 °С.

Ожидается, что в следующие три года (2022-2024 гг.) над регионом дальневосточных морей средняя температура воздуха составит 1,85 °С, т.е. будет соответствовать значению, при котором формируются средние по численности поколения горбуши, кеты и нерки (Хен и др., 2021). Их ожидаемый среднегодовой вылов составит 200, 75, 25 тыс. т., соответственно, т.е. меньше, чем в последние три четырехлетия. В 2025-2029 гг. среднегодовая температура воздуха может достичь 1,95 °С, что предполагает возможность небольшого увеличения численности лососей, но их суммарный ежегодный вылов будет на уровне 300-400 тыс. т. Вероятность повторения рекордных выловов второй половины 2010-х гг. у российского промысла невелика.

Вместе с тем, характерная особенность дальневосточных российских вод – наличие двух обширных акваторий в западных частях Берингова и Охотского морей, которые имеют весьма суровый климато-гидрологический режим. Их рыбопродуктивность значительно ниже, чем в восточных частях этих морей. При дальнейшем потеплении численность холодолюбивых видов здесь уменьшится, а более теплолюбивых – увеличится. В первую очередь это могут быть виды с высоким биотическим потенциалом (минтай, треска, сельдь и др.), которые в настоящее время формируют основу сырьевой базы российского рыболовства в дальневосточных морях (Шунтов, Иванов, 2019). Это будет особенно актуально для западной (российской) части Берингова моря, на которую приходится не более четверти общей биомассы рыб.

Одной из серьезных угроз морской экосистеме, связанных с глобальными климатическими изменениями, являются растущая эвтрофикация вод и увеличение рисков воздействия вредоносного цветения водорослей на окружающую среду (Hallegraeff et al., 2021). Оценки, сделанные для Японского моря на основе многолетних наблюдений, показывают тенденцию роста содержания биогенных элементов как в поверхностном, так и в глубинных слоях моря (Tishchenko et al., 2021). Опасность этого процесса продемонстрирована событием экологической катастрофы на акватории Авачинского залива на Камчатке осенью 2020 г., связанной с резким ростом температуры воды, обусловившей вспышку вредоносного цветения водорослей и последующий массовый замор морских организмов на шельфе юго-восточной части полуострова.

## Список использованных источников


**Аксенов П. В., Иванов В. В., 2018:** «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон. Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 64, № 1. – С. 42-54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54.

**Алдакимова А. Я., Некрасова М. Я., Студеникина Е. И., 1977:** Гидробиологический режим Азовского моря и его изменения в связи с преобразованием речного стока. Вопросы биогеографии Азовского моря и его бассейна. – Л. – С. 90-103.

**Амосова В. М., Васильева Т. Г., Зезера А. С., 2018:** О перспективах развития отечественного промысла шпрота в Балтийском море до 2025 г. // Труды ВНИРО. – Т. 171. – С. 39-55.

**Амосова В. М., Зезера А. С., Васильева Т. Г., 2020:** Анализ современного российского промысла шпрота в Балтийском море // Труды ВНИРО. – Т. 182. – С. 77-86.

**Амосова В. М., Зезера А. С., Карпушевская А. И., Карпушевский И. В, Патокина Ф. А., Дмитриева М. А., Винокур М. Л., Шумилова К. Ю., 2017:** Биологические и гидрологические компоненты, характеризующие многолетние изменения и современное состояние трески Gadus Morhua Callarias в Балтийском море (Гданьский бассейн, 26-й подрайон ИКЕС). Вопросы рыболовства. – Т. 18, № 1. – С. 42-51.

**Басюк Е. О., 2011:** Межгодовая изменчивость аномалий температуры в толще вод западной части Берингова моря с 1950 по 2010 г. // Вопросы промысловой океанологии, Изд-во ВНИРО. – Вып. 8, № 1. – С. 125-147.

**Басюк Е. О., Зуенко Ю. И., 2019:** Берингово море 2018 – экстремально малоледовитый и теплый год // Известия ТИНРО. – Т. 198. – С. 119-142. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.

**Бронфман А. М., Воловик С. П., Макарова Г. Д., 1979:** Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. – М.: Пищевая промышленность. – 288 с.

**Бухарицин П. И., Андреев А. Н., 2006:** Ритмы солнечной активности и ожидаемые экстремальные климатические события в Северо-Каспийском регионе на период 2007-2017 гг. Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе // Труды международной конференции. – Москва, 19-20 октября 2006 г. – С. 137-143.

**Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз, 2016:** Под ред. Е. С. Нестерова. – М.: Триада лтд. – 378 с.

**Воловик С. П., 1986:** Основные черты преобразования экосистемы Азовского моря в связи с развитием рыбного хозяйства в его бассейне // Вопросы ихтиологии. – № 16. – С. 37-47.

**Гайко Л. А., 2019:** Температурные изменения вдоль побережья Приморского края в современный период (северо-западная часть Японского моря) // Вестник СВНЦ. – № 2. – С. 29-37. DOI: 10.34078/1814-0998-2019-58-2-29-37.

**Гинзбург А. И., Костяной А. Г., 2018:** Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 15, № 7. – С. 195-207.

**Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А., 2021а:** Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980-2020 гг.) // Океанология. – Т. 61, № 6. – С. 900-912.

**Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А., 2021б:** Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 18, № 5. – С. 277-291.

**Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., 2011:** Черное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982-2009, спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 8, № 4. – С. 209-218.

**Глебова С. Ю., 2011:** Циклоническая деятельность над Азиатско-Тихоокеанским регионом зимой и ее влияние на термические условия дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. – № 10. – С. 35-43.

**Гребневик Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) в Азовском и Черном морях: биология и последствия вселения, 2000:** Под ред. С. П. Воловика. – Ростов-на-Дону: Батайское книжное издательство. – 500 с.

**Гришин М. Г., 2012:** Ледниковые периоды и аномальные зимы на побережье Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон

и комплексное использование ресурсов шельфа. – № 26-1. – С. 134-147.

**Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В., 2019:** Оценка средней температуры поверхностного слоя Азовского моря на основе данных спутниковой съемки и наблюдений прибрежных гидрометеостанций / В кн.: ИнтерКарто. ИнтерГис. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. Материалы международной конференции. – М.: Издательство Московского университета. Т. 25, часть 1. – С. 112-120.

**Дашкевич Л. В., Немцова Л. Д., Бердников С. В., 2016:** Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 13, № 5. – С. 91-100.

**ДВНИГМИ, 2020:** Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень, ФГБУ «ДВНИГМИ»: http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16/gidrometeorologicheskij-byulleten-2020g.html.

**Думанская И. О., 2011:** Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – № 345. – С. 74-93.

**Егоров А. Г., 2020:** Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. – Т. 66, № 2. – С. 124-143. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.

**Еремина Т. Р., Бугров Л. Ю., Максимов А. А., Рябченко В. А., Шилин М. Б., 2014:** Воздействия изменения климата на морские природные системы. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Фед. Служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – С. 615-643.

**Еремина Т. Р., Исаев А. В., Волощук Е. В., Рябченко В. А., Максимов А. А., 2016:** Балтийское море в настоящем и будущем – климатические изменения и антропогенное воздействие / Под ред. Т. Р. Ереминой. – СПб.: изд. «ЛЕМА». – 152 с. ISBN 978-5-00105-102-2.

**Захаров В. Ф., 1996:** Морские льды в климатической системе. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат. – 213 с.

**Зезера А. С., 2009:** Многолетние изменения абиотических условий в Балтийском море (1975-2007 гг.). Промыслово-биологические исследования АтлантНИРО в 2006-2007 годах. Т. 1. Балтийское море и заливы. – Калининград. – С. 6-17.

**Зезера А. С., Амосова В. М., Патокина Ф. А., Карпушевский И. В., Васильева Т. Г., Калинина Н. А., 2014:** Результаты интегрированного анализа изменений абиотических условий и величин запасов основных промысловых видов рыб в Балтийском море (юго-восточная часть, Гданьский бассейн, 26 подрайон ИКЕС). Промыслово-биологические исследования АтлантНИРО в 2010-2013 годах. Т. 1. Балтийское море и его заливы. – Калининград: Изд-во «АтлантНИРО». – С. 6-19.

**Зезера А. С., Иванович В. М., 2011:** Изменения климата, абиотических условий и величины запасов основных промысловых видов рыб в Юго-Восточной Балтике в последние десятилетия. Мат. XV конф. по пром. океанологии, посвященной 150-летию со дня рождения академика Н. М. Книповича. – Калининград: Изд. «АтлантНИРО». – С. 123-126.

**Зуенко Ю. И., 2009:** Влияние изменений климата на основные элементы экосистемы Японского моря. Автореф. дис. … д-ра геогр. наук. – Владивосток: ТИНРО-центр. – 39 с.

**Зуенко Ю. И., Асеева Н. Л., Глебова С. Ю., Гостренко Л. М., Дубинина А. Ю., Дулепова Е. П., Золотов А. О., Лобода С. В., Лысенко А. В., Матвеев В. И., Муктепавел Л. С., Овсянников Е. Е., Фигуркин А. Л., Шатилина Т. А., 2019:** Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008-2018 гг.) // Известия ТИНРО. – Т. 197. – С. 83-107. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.

**Иванов В. В., 2011:** Усиление водообмена между шельфом и Арктическим Бассейном в условиях снижения ледовитости // Доклады Академии наук. – Т. 441, № 1. – С. 1-5.

**Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А., Колдунов Н. В, Репина И. А., Смирнов А. В., 2013:** Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. – № 4. – С. 50-65.

**Ивкина Н., Наурозбаева Ж., Клове Б., 2017:** Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря // Центральноазиатский журнал исследований воды. – Т. 3, № 2. – С. 15-29.

**Карпушевский И. В., Зезера А. С., Иванович В. М., 2013:** Адаптационные особенности популяций пелагических и демерсальных рыб в пространствен-

ной и временной динамике фактора солености вод Балтийского моря // Труды Зоологического института РАН. – № 3. – С. 128-135.

**Катунин Д. Н., 2014:** Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. – Астрахань, КаспНИРХ. – 478 с.

**Косарев А. Н., Тужилкин В. С., 2000:** О многолетних изменениях термохалинного режима вод Каспийского моря // Каспийский плавучий университет. Научный бюллетень. – № 1. – Астрахань, КаспНИРХ. – С. 24-40.

**Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лебедев С. А., Шеремет Н. А., 2014:** Южные моря России / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). (Ред.) В. М. Катцов, С. М. Семенов. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». – С. 644-683.

**Кровнин А. С., Мельников С. П., Никитенко А. И., Мурый Г. П., 2019:** Влияние современных изменений климата на сообщества морских рыб в североатлантическом регионе // Ученые записки РГГМУ. – № 56. – С. 110-125. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-56-110-125.

**Крындин А. Н., 1964:** Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Труды ГОИН. – Вып. 71. – С. 5-83.

**Кубряков А. А., Станичный С. В., 2013:** Тренды уровня Черного моря по контактным и альтиметрическим измерениям // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 48-55.

**Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г., 2017:** Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 14, № 2. – С. 148-166.

**Лебедев С. А., Костяной А. Г., 2016:** Изменения уровня и динамики вод по данным спутниковой альтиметрии. Система Каспийского моря / А. П. Лисицын (отв. ред.). – М.: Научный мир. – С. 13-41.

**Лобанов В. А., Наурозбаева Ж. К., 2021:** О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии // Гидрометеорология и экология. – № 62. – С. 75-95.

**Лобанов В. Б., Данченков М. А., Лучин Е. В., Мезенцева Л. И., Пономарев В. И., Соколов О. В., Трусенкова О. О., Устинова Е. И., Ушакова Р. Н., Хен Г. В., 2014:** Глава 5.4. Дальневосточные моря России / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Москва: Росгидромет. – С. 684-743.

**Лобанов В. Б., Сергеев А. Ф., Марьина Е. Н., Прушковская И. А., Тищенко П. Я., Калинчук В. В., Колтунов А. М., Максеев Д. С., Сагалаев С. Г., Юрикова Д. А., Акулова Э. А., Апарина К. А., Загаруйко О. И., Зверев С. А., Крайников Г. А., Кукла С. П., Леусов А. Э., Лукьянова Н. Б., Рюмина А. А., Семкин П. Ю., Швецова М. Г., Шкирникова Е. М., Юрикова Е. А., Юрцев А. Ю., Якимов Т. С., 2021:** Исследование состояния и изменчивости вод северо-западной части Японского моря в осенне-зимний период в 62-м рейсе НИС «Академик Опарин» // Океанология. – Т. 61, № 5. – С. 838-840. DOI: 10.31857/S0030157421050075

**Лучин В. А., Матвеев В. И., 2016:** Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // ИзвестияТИНРО. – Т. 187. – С. 205-216.

**Малинин В. Н., 2009:** Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Известия РАН. Серия географическая. – № 6. – С. 7-16.

**Мезенцева Л. И., Евдокимова Л. И., Вражкин А. Н., 2019:** Повторяемость опасных явлений на акватории дальневосточных морей, вызванных выходом тропических циклонов // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 70-79.

**Мезенцева Л. И., Соколов О. В., Друзь Н. И., 2015:** Атмосферная циркуляция над Дальним Востоком в 2013 г. при экстремальном наводнении в бассейне Амура // Известия ТИНРО. – Т. 180. – С. 261-272.

**Мезенцева Л. И., Федулов А. С., 2017а:** Климатические тенденции атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке // Известия КГТУ. – № 46. – С. 175-183.

**Мезенцева Л. И., Федулов А. С., 2017б:** Современные изменения режимных характеристик ветра на станциях охотоморского побережья // Известия ТИНРО. – Т. 190. – С. 159-166.

**Мельников В. А., Москаленко Л. В., Кузеванова Н. И., 2018:** Ветровые циклы и климатические тренды Черного моря // Труды ГОИН. – № 219. – С. 101-123.

**Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане – 2018 год, 2019:** Под ред.

И. Е. Фролова. – Санкт-Петербург, ААНИИ. http://old.aari.ru/misc/publicat/gmo_arj_jour.php?idnum=215

**Орлов А. М., Савин А. Б., Горбатенко К. М., Бензик А. Н., Морозов Т. Б., Рыбаков М. О., Терентьев Д. А., Ведищева Е. В., Курбанов Ю. К., Носов М. А., Орлова С. Ю., 2020:** Биологические исследования в российских дальневосточных и арктических морях в трансарктической экспедиции ВНИРО // Труды ВНИРО. – Т. 181. – С. 102-143. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143.

**Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Изменчивость арктической трансполярной системы». Этап 2, 2018:** 269 с. Регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР: АААА-Б20-220032590110-7

**Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Арктическая трансполярная система в переходных климатических условиях». Этап 1, 2019:** 98 с. Регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР: АААА-А20-120032490157-4.

**Пичугин М. К., Гурвич И. А., Хазанова Е. С., Салюк П. А., 2020:** Некоторые особенности океанологических условий осеннего цветения микроводорослей у юго-восточного побережья Камчатки // Подводные исследования и робототехника. – № 4. – С. 70-73.

**Пищальник В. М., Дорофеева Д. В., Минервин И. Г., Шумилов И. В., Никулина И. В., 2019:** Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018. // Известия ТИНРО. – Т. 196. – С. 114-122. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-196-114-122.

**Пищальник В. М., Романюк В. А., Минервин И. Г., Батухтина А. С., 2016:** Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Известия ТИНРО. – Т. 185. – С. 228-239. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239.

**Плотников В. В., Мезенцева Л. И., Дубина В. А., 2015:** Циркуляция атмосферы над Дальним Востоком и ее отражение в ледовых процессах. – Владивосток: Дальнаука. – 164 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., 2021а:** Региональные особенности межгодовых изменений температуры воды в субарктической зоне Тихого океана // Метеорология и гидрология. № 2. – С. 67-79.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А., 2017:** Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Известия ТИНРО. – Т. 191. – С. 176-195.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А., 2018а:** Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Известия ТИНРО. – Т. 193, С. 167-192. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-168-183.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А., 2018б:** Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных акваториях и прилегающих районах Охотского моря // Вестник ДВО РАН. – № 6. – С. 20-34. DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.003.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н.И., 2021б:** Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. – Т. 37, № 2. – С. 162-178. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-162-178.

**Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И., Воронцов А. А., 2020:** Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 44-57.

**Ростов И. Д., Рудых Н. И., Ростов В. И., Воронцов А. А., 2016а:** Тенденции климатических и антропогенных изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море за последние десятилетия // Известия ТИНРО, т. 186, с. 163-181.

**Ростов И. Д., Рудых Н. И., Ростов В. И., Воронцов А. А., 2016б:** Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных водах северной части Японского моря // Вестник ДВО РАН. – № 5. – С. 100-112.

**Рябченко В. А., Карлин Л. Н., Исаев А. В., Ванкевич Р. Е., Еремина Т. Р., Молчанов М. С., Савчук О. П., 2016:** Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // Океанология. – Т. 56, № 1. – С. 41-50.

**Серых И. В., Костяной А. Г., 2019:** О климатических изменениях температуры Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – Т. 12, № 3. – С. 5-12.

**Серых И. В., Костяной А. Г., 2020:** О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических

параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 96-107.

**Сочнев О. Я., Корнишин К. А., Ефимов Я. О., Миронов Е. У., Порубаев В. С., 2019:** Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. – Т. 65, № 3. – С. 239-254. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254.

**Студеникина Е. И., Сафронова Л. М., Мирзоян З. А., Фроленко Л. Н., Толоконникова Л. И., Мартынюк М. Л., Шляхова Н. А., 2010:** Биологические основы формирования рыбопродуктивности Азовского моря в современный период. – Ростов-на-Дону. – 170 с.

**Терзиев Ф. С., Тужилкин В. С., Никонова Р. С., 2002:** Состояние основных характеристик гидрометеорологического режима Каспийского моря в характерные периоды стояния его уровня и их связь с внешними режимообразующими факторами. Каспийский плавучий университет. Научный бюллетень, № 1. – Астрахань, КаспНИРХ. – С. 20-40.

**Трусенкова О. О., 2018:** Долгосрочные изменения уровня Японского моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса. – № 2. – С. 38-47.

**Трусенкова О. О., Каплуненко Д. Д., 2013:** Оценка мод изменчивости уровня Японского моря по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. – Т. 53, № 3. – С. 347-356.

**Труфанова И. С., Амосова В. М., 2021:** Долгосрочный прогноз российской добычи сельди в Балтийском море // Труды ВНИРО. – Т. 186. – С. 78-90.

**Хен Г. В., Сорокин Ю. Д., Хен Ю. Г., 2021:** Изменение температуры воздуха и вылова тихоокеанских лососей в Дальневосточном бассейне России в 1948-2020 гг. и их прогноз до 2028 г. // Вопросы рыболовства. – Т. 23, № 2. – С. 5-19.

**Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д., 2019:** Изменчивость и взаимосвязь основных климатических индексов для северной части Тихого океана: тренды, климатические сдвиги, спектры, корреляции // Известия ТИНРО. – Т. 199. – С. 163-178.

**Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д., 2022:** Многолетние изменения термического условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО в связи с крупномасштабными климатическими процессами // Известия ТИНРО. – Т. 202, № 1. – С. 187-207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

**Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д., Матюшенко Л. Ю., 2011:** Базы данных о ледяном покрове дальневосточных морей, поддерживаемые в ТИНРО-Центре / Материалы докладов Седьмого Всероссийского симпозиума «Физика Геосфер», – Владивосток: Дальнаука. – С. 245-250.

**Шатилина Т. А., Анжина Г. И., 2011:** Изменчивость интенсивности дальневосточного муссона в 1948-2009 гг. // Известия ТИНРО. – Т. 167. – С. 146-159.

**Шляхов В. А., Гришин А. Н., 2009:** Состояние планктонного сообщества и промысла пелагических рыб в Черном море после вселения гребневиков Mnemiopsis leidyi и Beroe ovata // Рыбное хозяйство Украины. – № 5. – С. 53-60.

**Шунтов В. П., Иванов О. А., 2019:** Климатические изменения и современное состояние биоты российских вод дальневосточных морей // Известия ТИНРО. – Т. 197. – С. 83-107.

**Яицкая Н. А., Магаева А. А., 2018.:** Динамика ледового режима Азовского моря в XX-XXI вв. // Лед и Снег. – Т. 58, № 3. – С. 373-386.

**AACA, 2017:** Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP), Oslo, Norway. xiv + 267pp. https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-AACA-Barents-Area-Overview-report/1529.

**Arpe K., Leroy S. A. G., Lahijani H., Khan V., 2012:** Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level. Hydrology and Earth System Sciences, v. 16, pp. 19-27. DOI:10.5194/hess-16-19-2012.

**AVISO, 2021:** https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html.

**Avsar N. B., Jin S., Kutoglu S. H., 2018:** Interannual variations of sea surface temperature in the Black Sea. In: Proc. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2018). Valencia, Spain, 22-27 July 2018, pp. 5617-5620. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518183.

**Avsar N. B., Kutoglu S. H., 2020:** Recent sea level change in the Black Sea from satellite altimetry and tide gauge observations. International Journal of Geo-Information, v. 9, p. 185. DOI: 10.3390/ijgi903018.

**BACC, 2008:** Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. BACC Author Team 1st ed. Corr. 2nd printing, XXII, 474 p.

**BACC II Author Team, 2015:** Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Science & Business Media, 501 pp. DOI:10.1007/978-3-319-16006-1.

**BALTEX Phase II, 2006:** Science Framework and Implementation Strategy, 95 pp.

**Basyuk E., Zuenko Y., 2020:** Extreme oceanographic conditions in the northwestern Bering Sea in 2017-2018, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, vol. 181-182, 104909, https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104909.

**Caddy J. F., 2006:** The potential use of indicators, reference points and the traffic lights convention for managing Black Sea fisheries. General Fisheries Commission for the Mediterranean. Studies and Reviews. No. 83. Selected papers presented at the Workshop on Biological Reference Points (Rome, 20-21 April, 2004) / G. Lembo. (Ed.). Rome: FAO Publ., pp. 1-24.

**Casini M., Kall F., Hansson M., Plikshs M., Baranova T., Karlsson O., Lundstrom K., Neuenfeldt S., Gardmark A., Hjelm J., 2016:** Hypoxic areas, density-depence and food limitation drive the body condition of a heavily exploited marine fish predator. Royal Society Open Science, № 3, 160416. https://dx.doi.org/10.1098/rsos.160416.

**Cavalieri D. J., Parkinson C. L., Gloersen P., Zwally H. J., 1996:** Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (updated yearly). DOI: 10.5067/8GQ8LZQVL0VL.

**Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S., 2017:** Long-term Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, v. 44, pp. 6993-7001, DOI:10.1002/2017GL073958.

**Choi A. R., Park Y. G., Choi H. J., 2013:** Changes in the Tsushima Warm Current and the Impact under a Global Warming Scenario in Coupled Climate Models. Ocean and Polar Research, v. 35, № 2, pp. 127-134.

**Church J. A., Clark P. U., Cazenave A., Gregory J. M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M. A., Milne G. A., Nerem R. S., Nunn P. D., Payne A. J., Pfeffer W. T., Stammer D., Unnikrishnan A. S., 2013:** Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 1137-1216.

**CMS, 2020:** COPERNICUS Marine Service Oceans State Report, Issue 4, p.118.

**Daufresne M., Lengfellner K., Sommer U., 2009:** Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, № 31, pp. 21-58.

**Ding Y., Liu Y., Sun Y., Song Y., 2010:** Weakening of the Asian Summer Monsoon and Its Impact on the Precipitation Pattern in China. International Journal of Water Resources Development, v. 26, № 3, pp. 423-439. DOI: 10.1080/07900627.2010.492607.

**Dyldin Yu. V., Orlov A. M., 2021:** Annotated List of Ichthyofauna of Inland and Coastal Waters of Sakhalin Island. 1. Families Petromyzontidae – Salmonidae. Journal of Ichthyology, v. 61, № 1, pp. 48-79. DOI: 10.1134/S0032945221010057.

**Feldman V. N., Vasilieva T. G., 2001:** Changes in distribution, abundance and population structure of Baltic sprat in 1992-2000. ICES ASC Handbook, ICES Annual Science Conference ICES, 26-29 September 2000. Oslo, Norway. ICES CM 2001 /U:05. p.111.

**Feldman V. N., Zhigalova N. N., Patokina F. A., Zezera A. S., 2002.** Dynamics of zooplankton structure, sprat and herring feeding and trophic interactions in conditions of water warming in the southeastern Baltic Sea. ICES ASC Handbook, Annual Science Conference ICES, 29 September – 9 October, Copenhagen, Denmark. ICES CM/N:05: pp. 1-31.

**Fossheim M., Primicerio R., Johannesen E., Ingvaldsen R. B., Aschan M. M., Dolgov A. V., 2015:** Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. Nature Climate Change. Published online: 18 May 2015. DOI: 10.1038/NCLIMATE2647.

**Frolov I. E., Ivanov V. V., Filchuk K. V., Makshtas A. P., Kustov V. Yu., Mahotina I. A., Ivanov B. V., Urazgildeeva A. V., Syoemin V. L., Zimina O. L., Krylov A. A., Bogin V. A., Zakharov V. Yu., Malyshev S. A., Gusev E. A., Baryshev P. E., Pilgaev S. V., Kovalev S. M., Turyakov A. B., 2019:** Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V "Akademik Tryoshnikov". Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research, v. 65, № 3, pp. 255-274. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.

**Glantz M. H., 2002:** La Niña and its impacts: facts and speculations. Publ. The United Nations University, New York, 271 p.

**Hallegraeff G. M., Anderson D. M., Belin C., Bottein M.-Y.D., Bresnan E., Chinain M., Enevoldsen H., Iwataki M., Karlson B., McKenzie C. H., Sunesen I., Pitcher G. C., Provoost P., Richardson A., Schweibold L., Tester P. A., Trainer V. L., Yñiguez A. T., Zingone A., 2021:** Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts. Nature Communications Earth Environment, № 2, 10 p. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00178-8.

**HELCOM, 2019:** Annual Report, 18 pp., https://helcom.fi/media/publications/HELCOM-Activities-Report-2019.pdf.

**Hirose N., Ostrovskii A. G., 2000:** Quasi-biennial variability in the Japan Sea. Journal of Geophysical Research, v. 105, № 6, pp. 14011-14027.

**Holopainen R., Lehtiniemi M., Meier H. E. M., Albertsson J., Gorokhova E., Kotta J., Viitasalo M., 2016:** Impacts of changing climate on the non-indigenous invertebrates in the northern Baltic Sea by end of the twenty-first century. Biological Invasions, v. 18, № 10, pp. 3015-3032.

**Høyer J. L., Karagali I., 2016:** Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. Journal of Climate, v. 29, № 7, pp. 2529-2541.

**Høyer J. L, She J., 2007:** Optimal interpolation of sea surface temperature for the North Sea and Baltic Sea. Journal of Marine System, № 65, pp. 176-189. DOI:10.1016/j.jmarsys.2005.03.008.

**ICES, 2017:** Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea. WGIBAR 2017 Report 16-18 March 2017. Murmansk, Russia. ICES CM 2017/SSGIEA:04. 186 pp.

**ICES, 2018:** Interim Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR). WGIBAR 2018 REPORT 9-12 March 2018. Tromsø, Norway. ICES CM 2018/IEASG:04. 210 pp.

**ICES, 2019:** The Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR). ICES Scientific Reports. 1:42. 157 pp. http://doi.org/10.17895/ices.pub.5536.

**ICES, 2020:** Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR). ICES Scientific Reports. 2:30. 206 pp. http://doi.org/10.17895/ices.pub.5998.

**ICES Advice 2021.** ICES Ecosystem Overviews Baltic Sea Ecoregion. https://doi.org/10.17895/ices.advice.9437.

**Ingvaldsen R. B., Bogstad B., Dolgov A. V., Ellingsen K. E., Gjøsæter H., Gradinger R., Johannesen E., Tveraa T., Yoccoz N. G., 2015:** Sources of uncertainties in cod distribution models. Nature Climate Change, № 5, pp. 788-789. DOI: 10.1038/nclimate2761.

**IPCC, 2013:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

**IPCC, 2014:** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.

**IPCC, 2021:** Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds.) Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu and B. Zhou. Cambridge University Press.

**Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N. V., Repina I. A., Sandoe A. B., Smedsrud L. H., Smirnov A., 2016:** Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback, Journal of Physical Oceanography, v., 46, pp. 1437-1456. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.

**Ivanov V. V., Repina I. A., 2019:** Mid-winter anomaly of sea ice in the Western Nansen Basin in 2010s. IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science, 231 012024.

**Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E., 2019:** Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean-Air Heat Exchange in the Late Summer. Atmosphere, v. 10, 23 p. http://dx.doi.org/10.3390/atmos10040184.

**JMA, 2021:** Japan Meteorological Agency. State of ocean climate. Sea surface temperature (around Japan), updated on 10 March 2021 https://www.data.jma.go.jp/

gmd/kaiyou/english/long_term__japan/ sea_surface_ temperature_around_japan.html.

**Kahru M., Elmgren R., Kaiser J., Wasmund N., Savchuk O., 2020:** Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: Correlations with environmental factors. Harmful Algae, v. 92, № 101739. https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101739.

**Kang S. K., Cherniawsky J. Y., Foreman G. G. Min H. S., Kim C.-H., Kang H.-W., 2005:** Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data. Journal of Geophysical Research, v. 110, № C07. DOI:10/1029/2004JC002565.

**Kazmin A. S., 2021:** Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 250. https://doi.org/10.1016/j.ecsc.2020.107150.

**Kim Y.-Y., Kim D.-G., Jeong K. Y., Lee E., Byun D.-S., Cho Y.-K., 2021:** Local Sea-Level Rise Caused by Climate Change in the Northwest Pacific Marginal Seas Using Dynamical Downscaling. Frontiers in Marine Science, v. 8, Art. 620570, pp. 1-15. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.620570.

**Kjesbu O. S., Bogstad B., Devine J. A., Gjøsæter H., Howell D., Ingvaldsen R. B., Nash R. D. M., Skjæraasen J. E., 2014:** Synergies between climate and management for Atlantic cod fisheries at high latitudes. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 111, № 9, pp. 3478-3483. DOI: 10.1073/pnas.1316342111.

**Konsulov A., 1999:** Trophic determination of Ctenophora's new species invasion into the Black Sea. Comptes rendus de l'Academie Bulgaire des Sciences, v. 52, № 1-2. pp. 119-122.

**Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M., 2019:** Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions. Vittorio Barale and Martin Gade (eds.): Remote Sensing of the Asian Seas, Springer, Cham, Switzerland, pp. 505-521. DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.

**Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Volkov D. L., 2017:** Quantifying the impact of basin dynamics on the regional sea level rise in the Black Sea. Ocean Science, v. 13, pp. 443-452. DOI: 10. 5194/os-13-443-2017.

**Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H. J., Yi D., 2009:** Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008. Journal of Geophysical Research, v. 114., C07005. DOI:10.1029/2009JC005312.

**Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu., 2019:** Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea. Proc. SPIE, v. 11150. Remote Sensing of the Ocean, Sea ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 1115000Q (14 October 2019). https://doi.org/10.1117/12.2532136.

**Legeais J.-F., von Schuckmann K., Melet A., Storto A., Meyssignac B., 2018:** Sea Level, in Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 2. Journal of Operational Oceanography, № 11, S1, pp. s13-s16, DOI: 10.1080/1755876X.2018.1489208, 2018.

**Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J., 2011:** Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958-2009. Climate Research, v. 46, pp. 185-196, doi:10.3354/cr00876.

**Lehmann A., Myrberg K., Post P., Chubarenko I., Dailidiene I., Hinrichsen H. H., Hussy K., Liblik T., Lips U., Meier H. E. M., Bukanova T., 2021:** Salinity dynamics of the Baltic Sea. Earth System Dynamics. https://doi.org/10.5194/esd-2021-15.

**Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T., 2018:** Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. Nature climate change. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0205-y.

**Luchin V., Kruts A., Sokolov O., Rostov V., Rudykh N., Perunova T., Zolotukhin E., Pischalnik V., Romeiko L., Hramushin V., Shustin V., Udens Y., Baranova O., Smolyar I., Yarosh E., 2009:** Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan: NOAA Atlas NESDIS 67. International Ocean Atlas and Information Series. Washington, D.C.: U. S. Government Printing Office, v. 12, 329 p., CD-ROM.

**MacKenzie B. R., Koster F. W., 2004:** Fish production and climate: sprat in the Baltic Sea. Ecology, v. 85, pp. 784-794.

**Matishov G. G., Berdnikov S. V., Zhichkin A. P., Dzhenyuk S. L., Smolyar I. V., Kulygin V. V., Yaitskaya N. A., Povazhniy V. V., Sheverdyaev I. V., Kumpan S. V., Tretyakova I. A., Tsygankova A. E., D'yakov N. N., Fomin V. V., Klochkov D. N., Shatohin B. M., Plotnikov V. V., Vakulskaya N. M., Luchin V. A., Kruts A. A., 2014a:** Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013). Matishov, G. G., Sherman, K., Levitus, S. (Eds.), NOAA Atlas NESDIS 78, 131 p. DOI:10.7289/V5Q52MK5.

**Matishov G. G., Dzhenyuk S. L., Moiseev D. V., Zhichkin A. P., 2014b:** Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov. Oceanologia, v. 56, № 3, pp. 445-460. DOI: 10.5697/oc.56-3.445.

**Meier M., Edman M. K., Eilola K. J., Placke M., Neumann T., Andersson H., Brunnabend S., Dieterich C., Müller-Karulis B., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S., Savchuk O., 2018**: Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations. Frontiers in Marine Science. DOI: 10.3389/fmars.2018.00440.

**Mezentseva L. I., Soloveva E. E., 2019:** Regional aspects of climate system change. Climate Change and Natural Disasters in the Asia-Pacific Region: International Conference. Vladivostok, Far Eastern Federal University (FEFU, Russia) and Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (FEB RAS) (August 13-14, 2019 г.). https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/82d/CLIMATE_CHANGE_AND%20NATURAL_DISASTERS.pdf (Дата обращения 26.12.2019 г.).

**Miladinova S., Stips A., Garsia-Gorriz E., Macias Moy D., 2017:** Black Sea thermohaline properties: long-term trends and variations. Journal of Geophysical Research, v. 122, DOI: 10.1002/2016JC012644.

**Mulet S., Nardelli B. B., Good S., Pisano A., Greiner E., Monier M., Autret E., Axell L., Boberg F., Ciliberti S., Drévillon M., Droghei R., Embury O., Gourrion J., Høyer J., Juza M., Kennedy J., Lemieux-Dudon B., Peneva E., Reid R., Simoncelli S., Storto A., Tinker J., von Schuckmann K., Wakelin S. L., 2018.** Ocean temperature and salinity. In: Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 2. Journal of Operational Oceanography, № 11, sup. 1, s13-s16. DOI: 10.1080/1755876X.2018.1489208.

**Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M., 2020:** Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. Int. J. Climatol., vol. 40, pp. 2717-2731, https://doi.org/10.1002/joc.6362.

**NOAA, 2020;** NCEP/NCAR reanalysis: https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html

**Oppenheimer M., Glavovic B., Hinkel J., van de Wal R., Magnan A. K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R. M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meyssignac B., Sebesvari Z., 2019:** Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (pp. 321-445). https://doi.org/10.1126/science.aam6284.

**Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Alkire M. B., Ashik I. M., Baumann T. M., Carmack E. C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V. V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A., 2017:** Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. Science, v. 356, № 6335, pp. 285-291. https://www.science.org/doi/10.1126/science.aai8204.

**Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P., 2020:** The other side of sea level change. Nature Communications Earth & Environment, № 1, p. 69, https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6.

**Rutgersson A., Jaagus J., Schenk F., Stendel M., 2014:** Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. Climate Research, v. 61, pp. 177-190. DOI: 10.3354/cr01244.

**Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafson O., 2010:** Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. Science, v. 327, № 5970, pp. 1246-1250. DOI: 10.1126/science.1182221.

**Shiganova T. A., Sommer U., Javidpour J., Molinero J. C., Malej A., Kazmin A. S., Isinibilir M., Christou E., Siokou-Frangou I., Marambio M., Fuentes V., Mirsoyan Z. A., Gülsahin N., Lombard F., Lilley M. K. S., Angel D. L., Galil B. S., Bonnet D., Delpy F., 2019:** Patterns of invasive ctenophore Mnemiopsis leidyi distribution and variability in different recipient environments of the Eurasian seas: A review. Marine Environmental Research, No. 152, pp. 1-23. DOI: 10.1016/j.marenvres.2019.104791.

**Sooraj K. P., Terray P., Mujumdar M., 2015:** Global warming and the weakening of the Asian summer monsoon circulation: assessments from the CMIP5 models. Climate Dynamics, v. 45, № 1, pp. 233-252. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2257-7.

**Tarasenko A., Supply A., Kusse-Tiuz N., Ivanov V., Makhotin M., Tournadre J., Chapron B., Boutin J., Kolodziejczyk N., Reverdin G., 2021:** Properties of surface water masses in the Laptev and the East Siberian

seas in summer 2018 from in situ and satellite data. Ocean Science, v. 17, pp. 221-247. https://doi.org/10.5194/os-17-221-2021, 2021.

**The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for teachers based on the IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC), 2020:** https://www.oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP_SROCC-EN-10-WEB.pdf.

**Tishchenko P., Lobanov V., Kaplunenko D., Sagalaev S., Tishchenko P., 2021:** Acidification and Deoxygenation of the Northwestern Japan/East Sea. Journal of Marine Science and Engineering, No. 9, art. № 953. https://doi.org/10.3390/jmse9090953.

**Ustinova E. I., Sorokin Yu. D., 2013:** Recent state and variability of climate and oceanographic conditions in the Far-Eastern Seas. Ecology of the marginal seas and their basins. Materials Int. Sci. Conf., Vladivostok, DVFU, pp. 343-352.

**Vuorinen I., Hänninen J., Rajasilta M., Laine P., Eklund J., Montesino-Pouzols F., Corona F., Junker K., Meier H. E. M., Dippner J. W., 2015:** Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas–implications for environmental monitoring. Ecological Indicators, v. 50, pp. 196-205.

**WGBFAS, 2011:** Report of the Baltic Fisheries Assessment Working Group (ICES Headquarters, Copenhagen, 12-19 April 2011) // ICES CM/ACOM:10, 842 pp.

**WGIAB, 2011:** Practical guidelines for performing Integrated Ecosystem Analyses. Report of the ICES/HELCOM Working Group on Integrated Assessments of the Baltic Sea (Mallorca, Spain, 4-8 April 2011) // ICES CM/SSGRSP:03, 139 pp.

**Yoon S.-T., Chang K.-I., Na H., Minobe S., 2016:** An east-west contrast of upper ocean heat content variation south of the subpolar front in the East/Japan Sea. Journal of Geophysical Research, v. C121 № 8, pp. 6418-6443. DOI:10.1002/2016JC011891.

**Yoon S.-T, Chang K.-Il., Nam S.-H., Rho T.-K., Kang D.-J., Lee T., Park K.-A., Lobanov V., Kaplunenko D., Tishchenko P., Kim K-R., 2018:** Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world. Nature Scientific Reports, v. 8, art. № 1576. |DOI:10.1038/s41598-018-19952-4.

# 2.2 Население

## 2.2.1 Демографическая ситуация и миграция

*С. В. Рязанцев, А. С. Лукьянец, Е. М. Моисеева*

**Введение**

К настоящему моменту научное сообщество располагает достаточно достоверными доказательствами того, что глобальное изменение климата оказывает влияние на миграцию населения и смертность, но убедительных доказательств того, что изменение климата может оказывать влияние на рождаемость пока не получено.

Климатические изменения воздействуют на естественное и миграционное движение населения напрямую и косвенно. Непосредственное воздействие связано с ростом числа и интенсивности опасных природных явлений (экстремальных температур, засух, наводнений, лавин и селей, штормов и ураганов и т.д.). Косвенное воздействие происходит за счет того, что постепенные изменения окружающей среды (температуры, осадков, ветра, солнечной радиации, уровня моря, состава почв, лесного покрова и т.д.) ухудшают экологическую ситуацию, трансформируют привычные условия хозяйственной деятельности человека и социально-экономическую обстановку (Lukyanets et al., 2019).

В данной главе рассмотрены важнейшие направления воздействия климатически обусловленных факторов на основные демографические показатели (рождаемость и смертность), а также на миграцию населения. Основное внимание уделяется проблемам демографического развития и демографической безопасности Российской Федерации в контексте новых вызовов и возможностей, порожденных в условиях глобального изменения климата.

Социально-экономические, как и демографические последствия глобального изменения климата проявляются по разным регионам мира неравномерно. Степень уязвимости России к ним сравнительно низка, поэтому в отечественной науке данная тема пока не получила столь же большого развития, как в зарубежной. Имеющиеся исследовательские разработки представлены главным образом иностранными учеными (см., напр., O'Neill et al., 2000; Stephenson et al., 2010 и др.) и международными организациями (см., напр., UNFPA, 2009; IOM, 2014 и др.). Большинство эмпирических исследований носят региональный характер (см., напр., Mortreux, Barnett, 2009; Deschênes, Greenstone, 2011 и др.). Российские ученые внесли заметный вклад в изучение воздействия климатических изменений на здоровье и заболеваемость населения (см., напр., Ревич, 2008; Хаснулин, Хаснулина, 2012 и др.), что нашло отражение в настоящем докладе (см. гл. 2.2.3 и 2.2.4).

Сама по себе идея о взаимосвязи демографических и климатических процессов не нова, но изначально она обсуждалась учеными преимущественно в разрезе влияния роста численности населения мира на экологическую ситуацию за счет увеличения антропогенной нагрузки, выбросов парниковых газов и исчерпания природных ресурсов. Из этой идеи исходят многие неомальтузианские концепции и знаковые научные труды, поставившие под сомнение неолиберальную модель глобализации (см., напр., Медоуз и др., 2012). Однако по мере усиления

климатических изменений появились доказательства наличия обратной связи. Методы, позволяющие провести целостную оценку последствий изменения климата для демографической ситуации, пока не выработаны.

#### 2.2.1.1 Рождаемость

Благодаря сложным системам жизнеобеспечения, созданным человеком, непосредственное влияние погодных условий на его организм в значительной мере ограничено, что позволяет ему успешно существовать даже в крайне некомфортных климатических зонах. Это объясняет тот факт, почему учеными пока не было получено каких-либо эмпирических доказательств того, что изменение климата само по себе непосредственно может оказывать сколько-нибудь заметное влияние на показатели рождаемости населения сегодня или в обозримом будущем.

Стоит все же отметить, что биологами давно доказано влияние сезонных изменений температуры воздуха, влажности и продолжительности светового дня (солнечного сияния) на размножение большинства живых видов, в том числе и млекопитающих. Современные исследования подтверждают, что изменение климата может оказать серьезное воздействие на репродукцию многих животных, растений и микроорганизмов, которое потенциально способно привести к изменению ареалов их обитания и даже полному исчезновению определенных видов (см., например, Bronson, 2009).

Отдельные исследования показывают, что сезонность и погодные условия также оказывают влияние и на количество зачатий у людей в глобальном масштабе (Rojansky et al., 1992), при этом экстремальные температуры снижают вероятность зачатия. Предпочтительными являются среднесуточные температуры ≈12 °C и продолжительность светового дня около 12 часов (Roenneberg, Aschoff, 1990, с. 237). Таким образом, несмотря на то, что индустриализация и технологизация всех сфер жизни продолжают снижать непосредственное воздействие условий окружающей среды на организм человека и его жизнедеятельность, изменение климата все же будет вносить некоторый вклад в изменение его биологических ритмов, предопределяющих в том числе и фертильность.

На территории Российской Федерации в целом наиболее быстрый рост наблюдается для весенних (0,66 °C/10 лет) и осенних (0,50 °C/10 лет) температур, продолжительность солнечного сияния также растет со средней скоростью 1,2% в 10 лет (Росгидромет, 2020, с. 16, 66), что, с теоретической точки зрения, должно благотворно сказываться на фертильности. Однако на практике на уровне больших статистических совокупностей число рождений определяет половозрастная структура населения, а также репродуктивные установки и репродуктивное поведение. Последние же зависят от сложной совокупности факторов социально-экономической и социокультурной природы. Поэтому проводить оценки или строить прогнозы по данному показателю, исходя из природно-климатических данных, не представляется возможным.

Опосредованное влияние изменения климата на воспроизводство населения на современном этапе оказывается сильнее, чем его непосредственное воздействие. Демографами установлено, что экономические кризисы негативно влияют на репродуктивные планы населения и, как следствие, на показатели рождаемости (см., например, Sobotka et al., 2011).

Поэтому представляется, что вектор динамики этих показателей под воздействием изменения климата будет главным образом зависеть от того, насколько большой ущерб будут наносить экономике России климатические изменения и связанные с ними риски, как они повлияют на отраслевую структуру экономики и рынок труда, насколько велика будет обеспокоенность общества по поводу будущего и т.д.

Также очевидно, что снижение рождаемости будет наблюдаться на территориях, недавно пострадавших от стихийных бедствий, особенно среди населения, потерявшего имущество, жилье и вынужденного переселиться на новое место жительства. Подобные условия будут стимулировать откладывание рождений или отказ от них. Кроме того, климатические изменения будут вызывать косвенные потери населения за счет «потерянных» рождений людьми, для которых они привели к значительному ухудшению состояния здоровья или смерти. Косвенные демографические потери могут быть рассчитаны для любой чрезвычайной ситуации природного характера, исходя из числа женщин репродуктивного возраста, чью смерть она повлекла (Maksimova et al., 2020).

### 2.2.1.2 Смертность

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в 2000 г. климатические изменения и ухудшение экологической ситуации стали причиной не менее 150 тыс. дополнительных смертей по всему миру, а в период с 2030 по 2050 г. они будут вызывать порядка 250 тыс. смертей ежегодно. Согласно прогнозам ВОЗ, при условии реализации умеренно высокого сценария выбросов парниковых газов (SRES A1b / RCP 6.0) в Восточной Европе к 2030 г. из-за жары может наблюдаться от 1300 до 3000, а к 2050 г. – от 2500 до 4800 дополнительных смертей ежегодно. При этом в данном регионе под влиянием изменения климата не прогнозируется рост смертности по таким причинам, как желудочно-кишечные инфекции, малярия или недоедание, которые заметно участятся в других частях света (прежде всего в Африке южнее Сахары и Юго-Восточной Азии) (WHO, 2014).

Воздействие изменения климата на смертность может происходить непосредственным и опосредованным образом. Непосредственно к гибели людей могут привести опасные природные явления. Однако сложность количественной оценки здесь заключается в том, что зачастую невозможно однозначно установить, явилось ли глобальное изменение климата основной причиной возникновения того или иного стихийного бедствия, поскольку они происходили на протяжении всей истории человечества (Van Aalst, 2006). Эмпирические данные свидетельствуют лишь о том, что в последние десятилетия во всем мире погода становится все более неустойчивой, что способствует росту числа и масштабов природных катаклизмов метеорологической (тропические, внетропические, конвективные и локальные штормы), гидрологической (ливни, речные наводнения, сели, оползни) и климатической (экстремальные температуры, лесные пожары, засухи) природы[1].

На территории России число гидрометеорологических опасных явлений за последние 20 лет возросло вдвое (Росгидромет, 2017, с. 15). Однако число погибших от них сравнительно

[1] EM-DAT Query Tool // Emergency Events Database (EM-DAT). URL: https://public.emdat.be/.

невелико. По статистике Министерства чрезвычайных ситуаций (МЧС) Российской Федерации за 10 лет с 2012 по 2021 г. чрезвычайные ситуации природного характера становились причиной гибели в среднем 35 человек в год. Число пострадавших – значительно больше и достигает за этот период в среднем 80 798 человек в год (МЧС, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021), но методология статистического учета МЧС не позволяет установить, пострадали эти люди материально или физически и насколько серьезный урон был нанесен их здоровью. Согласно международной базе данных по чрезвычайным ситуациям EM-DAT с 2010 по 2021 г. к наибольшему числу смертей привели экстремальные температуры (жара на ЕТР летом 2010 г., холода зимой 2012 г. в центральном регионе, в Сибири и на Дальнем Востоке зимой 2012 г.), а также наводнения (на Кавказе в 2012 г. и др.) и лесные пожары (в Сибири и на ЕТР в 2010 г., в Сибири в 2015 г. и др.) Наибольшее число людей, получивших травмы, фиксировалось вследствие наводнений (см. табл. 2.2.1.1).

***Таблица 2.2.1.1***

*Количество погибших и пострадавших физически от опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации в 2010-2021 гг.*

| Год | Опасное природное явление | Территория | Число погибших (чел.) | Число пострадавших |
|---|---|---|---|---|
| 2010 | Наводнение | Села: Туапсинское, Джубгское, Новомихайловское, Вельяминовское, Георгиевское, Шаумянское, Шепсинское, Октябрьское, Тенгинское (Туапсинский р-н), село Уринское (Апшеронский р-н) (Краснодарский край) | 23 | |
| 2010 | Экстремальные холода | Москва, Московская обл., Санкт-Петербург, Ленинградская обл., Орловская обл., Чувашская Республика | 24 | 11 |
| 2010 | Экстремальная жара и лесные пожары | Москва, Московская, Белгородская, Брянская, Воронежская, Ивановская, Калужская, Липецкая, Нижегородская, Новгородская, Рязанская, Смоленская, Тамбовская обл. | 55 736 | |

*Примечание*: составлено на основе базы данных EM-DAT[1]

[1] EM-DAT Query Tool // Emergency Events Database (EM-DAT). URL: https://public.emdat.be/.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2010 | Лесные пожары | Волгоградская обл. | 8 | |
| 2011 | Очень сильный дождь | Благовещенск (Амурская обл.) | 1 | 14 |
| 2012 | Наводнение | Геленджик, Дивноморское, Крымск, Нижнебаканская, Неберджаевская, Кабардинка, Новороссийск (Краснодарский край) | 172 | 3910 |
| 2012 | Наводнение | Ростовская обл., Волгоградская обл., Респ. Калмыкия, Астраханская обл., Респ. Чечня, Респ. Дагестан, Респ. Ингушетия, Респ. Адыгея, Респ. Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесийская Респ., Респ. Северная Осетия, Краснодарский край, Ставропольский край | 7 | |
| 2012 | Экстремальные холода | Москва, Московская обл., Респ. Саха-Якутия, Хабаровский край, Красноярский край | 234 | 1594 |
| 2012 | Лесные пожары | Тыгда (Амурская обл.) | 2 | 346 |
| 2014 | Наводнение | Алтайский край, Респ. Алтай, Респ. Тыва, Респ. Хакассия, Респ. Адыгея | 6 | 2000 |
| 2015 | Лесные пожары | Респ. Хакасия, Читинская обл., Агинский Бурятский авт. округ | 30 | 997 |
| 2017 | Очень сильный дождь | Москва, Московская обл. | 16 | 201 |
| 2018 | Наводнение | Туапсинский р-н (Краснодарский край), Респ. Тыва, Алтайский край; Волгоградская обл. | 10 | 3 |
| 2019 | Наводнение | Красноярский край, Иркутская обл. | 59 | 204 |
| 2021 | Наводнение | Туапсе, Славянский р-н, Северский р-н, Сочи, Горячий Ключ, Геленджик (Краснодарский край) | 8 | 2 |
| 2021 | Очень сильный дождь | Гунибский, Гергебильский, Левашинский, Лакский, Курахский р-ны (Дагестан) | 6 | |

Также следует упомянуть о возможности возникновения так называемых природно-техногенных катастроф (в англоязычной терминологии – natech disasters), то есть аварий на техногенных объектах, спровоцированных природными условиями (UNDRR, 2020). Их последствия могут быть крайне серьезными и повлечь гибель многих людей. Так, например, 11 марта 2011 г. в результате сильнейшего землетрясения и последовавшего за ним цунами на японской АЭС «Фукусима-1» произошла радиационная авария максимального (седьмого) по Международной шкале ядерных событий уровня, что стало причиной гибели по меньшей мере 19,7 тыс. человек, еще 6,2 тыс. были ранены, более 470 тыс. – эвакуированы (Лукьянец и др., 2020а).

Помимо этого, природно-климатические условия могут вызывать рост числа аварий на транспорте, в том числе и с летальным исходом, за счет обледенения дорожного полотна для автомобильного транспорта, изменения морских течений и ветров, увеличения числа айсбергов для судоходства и т.д. Особую опасность в данном отношении могут представлять аварии при транспортировке химически опасных веществ.

Кроме того, экстремальные температуры, изменение влажности воздуха и перепады атмосферного давления, которые также учащаются по мере изменения климата, могут вызывать опасные обострения сердечно-сосудистых заболеваний (инфаркты), цереброваскулярных заболеваний (инсульты), болезней органов дыхания (астма, гипоксия), иммунопатологий (аллергии), которые могут привести к смерти (см. гл. 2.2.3). Так, в июле – августе 2010 г. в результате аномальной жары и вызванных ей лесных пожаров на ЕТР дополнительная смертность по стране составила порядка 55 тыс. случаев (Порфирьев, 2013). В зоне непосредственного воздействия аномально высоких температур, лесных пожаров и смога находилось около 41 млн человек (Рязанцев, 2012). Экстремальные температуры представляют особую опасность для жителей городов с недостаточным озеленением и повышенным уровнем загрязнения воздуха.

Косвенные пути воздействия изменения климата на смертность можно разделить на экологические и социальные. Первые обусловлены изменениями экосистем, в результате которых происходит расширение ареалов переносчиков трансмиссивных заболеваний человека, распространение желудочно-кишечных инфекций в местах недостаточного водоснабжения, переход в активное состояние возбудителей инфекций в районах таяния многолетней мерзлоты (см. гл. 2.2.4).

Пандемия COVID-19, разразившаяся в начале 2020 г., стала причиной смерти миллионов людей и показала, насколько разрушительными могут быть инфекции.

Многолетнемерзлые грунты же содержат не только споры возбудителя сибирской язвы, но и других особо опасных инфекций, а также древнейшие микроорганизмы, такие как пифовирус (Legendre et al., 2014), эпидемиология которых может быть непредсказуема.

В социальном плане изменение климата вызывает стресс и ухудшение психического состояния у людей, переживших стихийные бедствия (см., напр., Nolen-Hoeksema, Morrow, 1991). Некоторые исследования свидетельствуют о росте числа самоубийств в перио-

ды аномальной погоды (Deisenhammer, 2003) и учащении алкогольных психозов (Немцов и др., 2013). В беднейших странах серьезную опасность для жизни и здоровья населения представляют голод вследствие неурожаев, вызванных засухами, аномальными температурами, деградацией почв, а также дефицит чистой пресной воды (WHO, 2014). В странах с высокой долей сельского хозяйства в ВВП снижение урожайности становится причиной роста бедности, которая негативно сказывается на здоровье населения (Hallegatte et al., 2016). Маловероятным для России на настоящий момент, но все же возможным фактором остаются вооруженные столкновения по поводу контроля над водными или пищевыми ресурсами, которые уже имели место, например, между Таджикистаном и Кыргызстаном в 1982 и 1988 гг. из-за распределения воды (Большаков, 2011).

К группе риска по смертности от факторов, связанных с природно-климатическими условиями, относятся прежде всего пожилые люди и дети младшего возраста. С демографической точки зрения, наибольший ущерб наносит смертность детей и женщин в репродуктивных возрастах. Хотя последние не входят в группу риска, но их смерти влекут за собой косвенные демографические потери («потерянные» рождения). С экономической точки зрения, наибольшие потери приносит смертность населения трудоспособного возраста. Так, увеличение вклада климатического фактора в смертность населения хотя бы на 0,5% в ближайшее десятилетие означало бы экономический ущерб около 110 млрд рублей, или 0,3% ВВП, в соответствии с существующими оценками стоимости среднестатистической человеческой жизни в 30 млн рублей (Порфирьев, 2011).

### 2.2.1.3 Миграция

Природно-климатические условия и их изменения были фактором, оказывающим определяющее влияние на миграцию и размещение населения на протяжении всей истории человечества, начиная с древнейших времен (Huntington, 1913). Этот фактор сыграл огромную роль и в формировании так называемой основной полосы расселения на территории России, которая имеет форму клина с широким основанием вдоль западной и юго-западной границ и постепенно сужается по мере продвижения на восток, прилегая к южным рубежам. В целом ее границы совпадают с границами благоприятных и нейтральных для человека природно-климатических зон (см. рис. 2.2.1.1). Сегодня природно-климатические условия и гидрометеорологические явления продолжают оказывать влияние на перемещение населения как внутри России, так и через ее границы.

Согласно определению Международной организации по миграции, климатические мигранты – это лица или группы лиц, которые преимущественно по причине внезапного или медленно прогрессирующего изменения окружающей среды, вызванного изменением климата, были вынуждены покинуть свое постоянное место жительства или решили сделать это добровольно и переселились временно или постоянно внутри своей страны или за ее границы (IOM, 2014).

***Рис. 2.2.1.1*** *Разделение субъектов Российской Федерации по степени благоприятности природно-климатических условий*

*Примечание: по данным (Природно-климатические условия… 2018, с. 136)*

Наиболее очевидна роль природно-климатических условий в случае миграций, вызванных стихийными бедствиями. По данным международной организации «Центр мониторинга внутренних перемещений» (Internal Displacement Monitoring Center), осуществляющей сбор и анализ данных по численности внутренне перемещенных лиц, за 2010-2021 гг. на территории Российской Федерации из-за стихийных бедствий было эвакуировано в общей сложности более 148 тыс. человек (рис. 2.2.1.2).

Такие вынужденные миграции, как правило, являются краткосрочными и возвратными, поэтому не оказывают значительного влияния на территориальное распределение населения. Однако необходимость переселения тысяч человек сопряжена со значительными материальными затратами, которые, как правило, осуществляются за счет средств государственного бюджета. Кроме того, экстремальные природные события наносят большой ущерб физическому и психическому здоровью пострадавшего населения. Численность таких перемещенных лиц неизбежно будет возрастать по мере роста числа и масштабов опасных природных явлений на территории страны. Чтобы сократить наносимый ими ущерб, следует совершенствовать системы оповещения населения подвергаемых угрозам территорий и повышать готовность и техническую оснащенность экстренных служб.

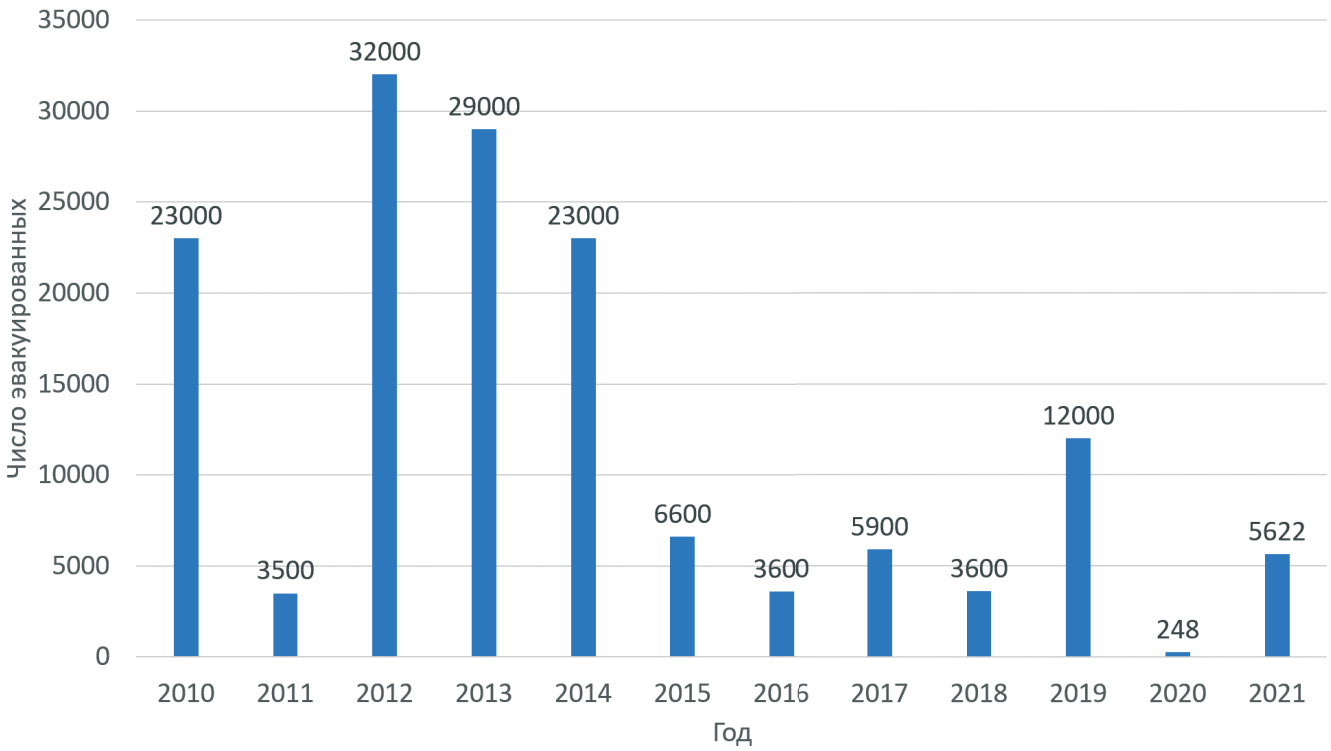



***Рис. 2.2.1.2*** *Число лиц, эвакуированных из-за стихийных бедствий на территории Российской Федерации за 2010-2021 гг. (чел.)*

*Примечание: Составлено на основе данных Internal Displacement Monitoring Center.*[1]

***Таблица 2.2.1.2***

*Субъекты Российской Федерации с наибольшей долей населения, выбывшего из-за неблагоприятных природно-климатических условий за период 2016-2020 гг.*

| Откуда выбыли | Всего выбывших за 5 лет (чел.) | Выбывших по данной причине за 5 лет | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | чел. | % | Куда выбыли | | |
| | | | | Внутри региона | Другой регион | Другая страна |
| Российская Федерация | 18 534 490 | 48 701 | 0,3 | 10 767 | 37 731 | 203 |
| Магаданская область | 38 248 | 453 | 1,2 | 22 | 431 | 0 |
| Камчатский край | 63 076 | 654 | 1,0 | 23 | 630 | 1 |
| Мурманская область | 175 233 | 1 558 | 0,9 | 28 | 1 521 | 9 |
| Ханты-Мансийский авт. округ | 318 600 | 2 656 | 0,8 | 333 | 2 323 | 0 |

[1] Internal Displacement Monitoring Center. Global Internal Displacement Database. URL:https://www.internal-displacement.org/database/displacement-data.

| Откуда выбыли | Всего выбывших за 5 лет (чел.) | Выбывших по данной причине за 5 лет | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | чел. | % | Куда выбыли | | |
| | | | | Внутри региона | Другой регион | Другая страна |
| Ямало-Ненецкий авт. округ | 155 518 | 1 295 | 0,8 | 201 | 1 092 | 2 |
| Республика Коми | 167 079 | 1 185 | 0,7 | 83 | 1 100 | 2 |
| Ненецкий авт. округ | 9 933 | 65 | 0,7 | 14 | 51 | 0 |
| Хабаровский край | 238 832 | 1 536 | 0,6 | 69 | 1 464 | 3 |
| Чукотский авт. округ | 22 595 | 122 | 0,5 | 2 | 120 | 0 |
| Республика Саха (Якутия) | 187 902 | 992 | 0,5 | 78 | 909 | 5 |
| Сахалинская область | 96 763 | 504 | 0,5 | 36 | 467 | 1 |
| Кемеровская область | 317 378 | 1 467 | 0,5 | 270 | 1 188 | 9 |
| Архангельская область без АО | 183 873 | 836 | 0,5 | 179 | 654 | 3 |
| Иркутская область | 282 114 | 1 264 | 0,5 | 497 | 766 | 1 |
| Амурская область | 129 965 | 579 | 0,5 | 83 | 488 | 8 |
| Еврейская авт. область | 23 783 | 104 | 0,4 | 0 | 104 | 0 |
| Новосибирская область | 309 796 | 1 342 | 0,4 | 355 | 975 | 12 |
| Алтайский край | 339 722 | 1 349 | 0,4 | 633 | 708 | 8 |
| Забайкальский край | 143 134 | 561 | 0,4 | 23 | 537 | 1 |
| Омская область | 252 742 | 987 | 0,4 | 84 | 895 | 8 |

*Примечание*: Рассчитано на основе данных Росстата, предоставленных по запросу.
Субъекты Российской Федерации ранжированы в порядке убывания доли выбывших по причине «несоответствия природно-климатическим условиям» в общей численности выбывших

Вместе с тем неблагоприятные природно-климатические условия могут становиться причиной добровольной и безвозвратной миграции населения. В том числе их причиной может становиться ухудшение условий жизни и хозяйственной деятельности, вызванное негативны-

ми изменениями окружающей среды (Black et al., 2011). Почти половина территории России лежит в природно-климатических зонах, которые являются неблагоприятными и некомфортными для человека. В строгом смысле отток населения с этих территорий нельзя назвать климатической миграцией, если мы не располагаем доказательствами того, что причиной переселения послужили именно изменения климата, а не нормальный для этих территорий суровый климатический режим. Кроме того, статистический учет климатических мигрантов имеет ряд особенностей, в силу которых он становится возможен либо в ходе организованной эвакуации, либо путем их самостоятельного сообщения о причинах переселения (Lukyanets et al., 2019). Опросы экспертов и населения, проведенные в районах Крайнего Севера, показали, что нередко природно-климатические факторы оказывают влияние на решение о миграции опосредованно, обуславливая уровень развития инфраструктуры, состояние рынка труда и прочие характеристики социально-экономического развития региона, поэтому могут не идентифицироваться в качестве причины переселения даже самими мигрантами (Лукьянец, Моисеева, 2018). Таким образом, имеющиеся данные статистического учета верно отражают направления потоков климатической миграции в России, но не их реальные масштабы.

По данным Росстата, «несоответствие природно-климатическим условиям» стало причиной 0,27% всех миграционных перемещений населения на территории Российской Федерации за пять лет с 2016 по 2020 г. В качестве обстоятельства, вызвавшего необходимость смены места жительства, данную причину за это время указали в сумме более 100 тыс. человек (из них 48,7 тыс. – как причину выбытия, и 53,4 тыс. – как причину прибытия). Значимой динамики в ежегодной численности переселившихся по данной причине на протяжении рассматриваемого периода не наблюдается. Наибольшая доля выбытий по причине несоответствия природно-климатическим условиям (в общем числе выбывших по всем причинам) наблюдается в регионах Арктики, Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири (см. табл. 2.2.1.2), то есть в зонах с неблагоприятными природно-климатическими условиями (см. рис. 2.2.1.1). В то же время наибольшая доля прибытий по этой причине фиксируется в центре и на юге ЕТР (см. табл. 2.2.1.3), то есть в зонах с благоприятными и нейтральными природно-климатическими условиями (см. рис. 2.2.1.1).

Согласно данным метеонаблюдений, наиболее быстрый рост среднегодовых температур наблюдается именно в Арктической зоне России и районах Крайнего Севера (см. раздел 1.2). Однако потепление не означает, что условия жизни и хозяйственной деятельности на этих территориях становятся более комфортными. Напротив, изменение климата несет многочисленные риски для экосистем, инфраструктуры и здоровья населения данных регионов (Росгидромет, 2017). Это означает, что в ближайшие десятилетия с большой степенью уверенности можно прогнозировать увеличение роли природно-климатического фактора в «выталкивании» мигрантов из северных регионов России.

***Таблица 2.2.1.3***

*Субъекты Российской Федерации с наибольшей долей населения, прибывшего в связи с более благоприятными природно-климатическими условиями за период 2016-2020 гг.*

| Куда прибыли | Всего прибывших за 5 лет (чел.) | Прибывших по данной причине за 5 лет | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | чел. | % | Откуда прибыли | | |
| | | | | Внутри региона | Другой регион | Другая страна |
| Российская Федерация | 19 396 870 | 53 367 | 0,3 | 10 767 | 37 726 | 4 874 |
| Краснодарский край | 805 557 | 16 379 | 2,0 | 818 | 15 115 | 446 |
| Калининградская область | 195 346 | 2 231 | 1,1 | 247 | 1 661 | 323 |
| г. Севастополь | 98 028 | 893 | 0,9 | 37 | 720 | 136 |
| Республика Адыгея | 76 283 | 660 | 0,9 | 15 | 605 | 40 |
| Республика Крым | 206 178 | 1 408 | 0,7 | 7 | 1234 | 167 |
| Ярославская область | 157 191 | 793 | 0,5 | 293 | 430 | 70 |
| Алтайский край | 315 585 | 1 579 | 0,5 | 633 | 547 | 399 |
| Воронежская область | 350 201 | 1 579 | 0,5 | 300 | 920 | 359 |
| Новосибирская область | 349 228 | 1 148 | 0,3 | 355 | 594 | 199 |
| Вологодская область | 122 860 | 398 | 0,3 | 174 | 215 | 9 |

*Примечание*: Рассчитано на основе данных Росстата, предоставленных по запросу.
Субъекты Российской Федерации ранжированы в порядке убывания доли выбывших по причине «несоответствия природно-климатическим условиям» в общей численности выбывших

Опасность этой тенденции с точки зрения демографической безопасности страны заключается в том, что не только районы Крайнего Севера, но также Сибирь и Дальний Восток в целом на современном этапе сталкиваются с депопуляцией и мощным миграционным оттоком населения. Так, за 2016-2020 гг. по данным Росстата, миграционная убыль населения районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к ним, составила суммарно 195,5 тыс. человек, по Дальневосточному федеральному округу – 108,1 тыс. человек, по Сибирскому федеральному округу – 98,1 тыс. человек. Безусловно, природно-климатические условия и климатические изменения являются только одним из факторов в сложном комплексе причин, обуславливающих эту ситуацию. Но данный фактор имеет особо значение, поскольку его воздействие порождает каскадные эффек-

ты, затрагивающие инфраструктуру всех видов, большинство отраслей экономики, рынок труда, жизнь и здоровье людей. К тому же способность человека целенаправленно изменять природно-климатические условия и как-либо управлять ими крайне ограничена. Именно поэтому важно своевременно принять меры по адаптации к изменениям климата прежде всего для наиболее уязвимых регионов (см. часть 3).

Вместе с тем растет поток мигрантов, прибывающих в Россию по причинам несоответствия природно-климатическим условиям и экологического неблагополучия из-за рубежа, прежде всего из стран СНГ, среди которых по числу прибывших лидируют страны Центральной Азии (см. рис. 2.2.1.3). По данным Росстата, за период с 2016 по 2020 г. эта компонента обеспечила в сумме прирост населения России на 8,5 тыс. человек, страны СНГ дали 96% этого прироста.

Следует еще раз заметить, что эти данные были получены из форм миграционного учета, где мигранты самостоятельно указывают основную причину своего прибытия или выбытия. Поэтому данные статистики не могут в полной мере отражать роль изменения климата в росте миграционных потоков. Так, например, в странах Центральной Азии, где относительно велика доля населения, занятого в сельском хозяйстве, и высок уровень бедности, климатические изменения приводят к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур, что не позволяет сельскому населению получить привычный уровень дохода и вынуждает часть его искать альтернативные источники заработка (Лукьянец и др., 2020б). Такие мигранты осуществляют перемещения – как внутри своих стран, так и за их пределы – в поисках работы, что означает их отнесение формально к категории трудовых мигрантов, а не климатических.

***Рис. 2.2.1.3*** *Численность мигрантов, прибывших в 2016-2020 гг. в Россию из стран СНГ по причинам климатического и экологического характера (чел.)*

*Примечание: рассчитано на основе данных Росстата, предоставленных по запросу*

Оценки численности климатических мигрантов возможны только на основе математического моделирования, поэтому они значительно разнятся в зависимости от использовавшегося в том или

ином исследовании подхода. Так, согласно прогнозу климатической миграции, разработанному исследовательской группой Всемирного банка, к 2050 г. в Центральной Азии средняя доля населения, переселяющегося внутри своих стран из-за медленно прогрессирующих изменений окружающей среды под воздействием глобального изменения климата, может составить 1,9 млн человек (2,55% от общей численности населения) при реализации инерционного сценария (Clement et al., 2021). Данный прогноз основан на математической модели движения населения, которая объединяет данные о демографической ситуации, социально-экономическом развитии стран и климатических изменениях. Модель имеет ряд методологических ограничений: например, не учитывает миграции на расстояние менее 14 км, временные промежутки менее 10 лет и т.д. и не дает прогноза изменения численности международных мигрантов.

При допущении, что доля России в миграционных потоках из этих стран не изменится и составит в среднем 5,8% от общего числа мигрантов (см. табл. 2.2.1.4), мы можем рассчитать, что в Россию вследствие изменения климата к 2050 г. направится суммарно около 120 тыс. мигрантов из центральноазиатских государств. Это равносильно прибытию 4 тыс. человек в год в период с 2020 по 2050 г. Для сравнения, по данным Росстата, в одном 2020 г. в страну въехало более 266 тыс. человек из рассматриваемого региона.

***Таблица 2.2.1.4***

*Миграция в Россию из стран Центральной Азии в 2016-2020 гг.*

| Страна | Миграционный отток за пять лет | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Общий | | внешний (эмиграция) | | эмиграция в Россию | |
| | чел. | % | чел. | % | чел. | % |
| Республика Казахстан | 4 577 498 | 100 | 188 806 | 4,2 | 164 829 | 3,6 |
| Кыргызская Республика | 250 616 | 100 | 33 483 | 13,4 | 23 997 | 9,6 |
| Республика Таджикистан | 220 882 | 100 | 18 288 | 8,3 | 11 988 | 5,4 |
| Республика Узбекистан | 891 552 | 100 | 93 297 | 10,5 | 39 806 | 4,5 |

*Примечание*

Источник: Демографический ежегодник Казахстана[1]; Национальный статистический комитет Кыргызской Республики[2]; Демографический ежегодник Республики Таджикистан[3]; Демографическая ситуация в Республике Узбекистан[4].

Соответствующие данные по миграции не представлены в базах данных и публикациях национальной статистической службы Туркменистана

[1] Демографический ежегодник Казахстана // Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. URL: https://stat.gov.kz/edition/publication/collection.

[2] Население // Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. URL: http://www.stat.kg/ru/statistics/naselenie/.

[3] Демографический ежегодник Республики Таджикистан. – Душанбе: Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан, 2020. – 362 с.

[4] Демографическая ситуация в Республике Узбекистан за январь – декабрь 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г. // Государственный комитет Республики Узбекистан по статистике. URL: https://stat.uz/ru/press-tsentr/novosti-goskomstata.

Таким образом, климатические изменения с большой степенью вероятности будут способствовать увеличению миграционного притока из стран СНГ в Россию, однако его возрастание нельзя назвать катастрофическим, в том числе с учетом прогнозируемых изменений на российском рынке труда (см. гл. 2.2.2).

### 2.2.1.4 Коренные малочисленные народы

Коренные малочисленные народы Севера, Сибири и Дальнего Востока являются особо уязвимой для воздействия изменения климата группой населения. Уклад их жизни и традиционные формы хозяйственной деятельности (оленеводство, рыболовство, охота, сельское хозяйство) напрямую зависят от природно-климатических условий. Выраженное потепление в широтах, где исторически расселяются данные народы, вкупе с экологическими последствиями деятельности по добыче полезных ископаемых в этих районах представляют серьезные риски для поддержания этими народами привычного образа жизни. В результате опросов представителей коренных малочисленных народов в ходе научных экспедиций были выявлены и подтверждены некоторые проявления климатических изменений, негативно влияющие на их жизнедеятельность.

Из-за учащения оттепелей и ветров в зимний период в тундре на почве образуются наст и ледяная корка, мешающие оленям добывать ягель. Подкорм же северных оленей другими видами пищи вызывает у них заболевания. Изменение сроков формирования снежного покрова и ледостава, а также прокладка трубопроводов меняют обычные пути миграции оленей.

Рост сезонных температур и прокладка трубопроводов под руслом рек приводят к сокращению численности и изменению видового состава рыб и мешают их прохождению на нерест, в том числе за счет шумового эффекта от трубопроводов. Сокращается численность промысловых морских млекопитающих. На суше также меняются сроки и маршруты сезонной миграции промыслового зверя.

Из-за таяния многолетней мерзлоты и строительства грунтовых дорог в традиционные места расселения коренных малочисленных народов проникают не распространенные там ранее насекомые и грызуны, включая переносчиков инфекционных заболеваний, в летний период увеличивается численность кровососущих насекомых: мошки и гнуса.

Дезадаптация к изменению климата (сезонных температур, влажности воздуха) вызывает у местного населения обострение заболеваний сердечно-сосудистой системы и дыхательных путей.

Эти причины вносят определенный вклад в то, что все больше молодежи предпочитает получать образование и искать работу в крупных городах, отказываясь от традиционного образа жизни. Падает ее интерес к национальным языкам и культурам коренных малочисленных народов.

Однако, несмотря на негативные последствия изменения климата для жизнедеятельности этих народов, риски социально-экономического характера, связанные с развитием производства и инфраструктуры, сохраняют безусловный приоритет как главная угроза для поддержания традиционного образа жизни этих народов и устойчивого развития территорий их проживания.

**Заключение**

Изменение климата оказывает влияние на демографические процессы, которое может быть как непосредственным, так и опосредованным. По оценкам, основанным на данных Росстата и прогнозах международных организаций, к 2030 г. природно-климатические изменения могут привести к росту смертности населения примерно на 0,1% и стать непосредственной причиной до 0,7% всех миграционных перемещений на территории России. В дальнейшем их роль будет только возрастать, причем при условии реализации неблагоприятных сценариев изменения климата рост станет экспоненциальным.

Все это свидетельствует о важности своевременного осуществления мер по адаптации к изменению климата в различных сферах жизни общества. Так, в целях сокращения смертности и сбережения здоровья населения необходимо уделять внимание профилактике заболеваний, обостряющихся под воздействием экстремальных погодных условий, своевременно пресекать вспышки инфекционных заболеваний, оптимизировать городскую среду, совершенствовать системы оповещения населения территорий, подверженных стихийным бедствиям, повышать готовность и техническую оснащенность экстренных служб, ужесточать требования к безопасности объектов инфраструктуры.
В рамках миграционной политики необходимо предпринять меры, направленные на сокращение оттока населения из районов Крайнего Севера, а также регионов Сибири и Дальнего Востока России, которые могут включать как меры непосредственного материального стимулирования, так и долгосрочные проекты по развитию инфраструктуры и рынка труда данных территорий.

Помощь коренным малочисленным народам Севера, Сибири и Дальнего Востока, которые проживают на территориях, особенно подверженных негативным последствиям изменения климата, может осуществляться в форме передачи им современных технологий и программ дополнительного субсидирования.

В случае сохранения текущих тенденций климатических изменений, а также демографического и социально-экономического развития в странах СНГ в ближайшие десятилетия России не угрожает массовый приток мигрантов из-за рубежа вследствие изменения климата. Соответственно, на сегодняшний день отсутствует необходимость принятия специальных мер внешней миграционной политики для обеспечения национальной безопасности в данном отношении. Помощь населению этих государств в контексте его адаптации к изменению климата может осуществляться в рамках двусторонних соглашений по трудовой миграции.
Однако эффективность и своевременность мер по минимизации негативного воздействия климатических изменений на демографические и социально-экономические процессы зависят прежде всего от качества и научной обоснованности его оценок, для получения которых необходимы точные и актуальные первичные данные. Их мониторинг должен вестись непрерывно с использованием диверсифицированных механизмов учета.

Разработать методологию оценки влияния изменения климата на рождаемость представляется затруднительным, т.к. она может быть осуществлена только на материале лонгитюдных социологических опросов, проведение которых потребует значительных материальных и человеческих ресурсов. В то же время климатические факторы не оказывают значи-

мого влияния на воспроизводство населения, что делает подобные исследования нецелесообразными.

Влияние климатических факторов на заболеваемость и смертность более очевидно и легче поддается статистическому учету. Перспективным направлением исследований в этом плане представляется статистический анализ данных по динамике климатических условий и зафиксированным случаям болезней и смертей по различным классам в разрезе временных рядов и пространственной выборки.

Для получения дополнительных данных о миграции населения в условиях изменения климата может быть предложено несколько конкретных мер совершенствования системы статистического учета на базе Росстата. Одной из них может стать возможность указания нескольких причин смены места жительства в формах миграционного учета. Это позволит получить более многомерную картину факторов миграции населения из северных регионов страны, равно как и внешней миграции в Россию из стран, страдающих от негативных последствий изменения климата. Другой подобной мерой может стать агрегирование информации из форм миграционного учета не только по причинам смены места жительства и половозрастному составу мигрантов, но также по причинам перемещения и их социально-экономическим характеристикам. Дополнительную информацию также могли бы дать таблицы (так называемые «шахматки»), показывающие регионы выбытия и вселения мигрантов, переселяющихся их-за климата. Такие данные позволили бы понять, как природно-климатические факторы влияют на миграцию различных групп населения и на направления миграционных потоков в стране.

## Список литературы


**Большаков А. Г., 2011:** Внешняя политика Киргизии в контексте изменения конфликтности на постсоветском пространстве // Россия и мусульманский мир. – № 6. – С. 83-96.

**Лукьянец А. С., Моисеева Е. М., 2018:** Влияние природно-климатических и экологических факторов на миграционные процессы в Арктических территориях Красноярского края Российской Федерации // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. – № 6. – С. 28-46. DOI: 10.26653/2076-4650-2018-6-03.

**Лукьянец А. С., Очирова Г. Н., Филатов И. А., 2020а:** Зарубежный опыт управления миграционными потоками при техногенных катастрофах // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. – № 1-2. – С. 32-44. DOI: 10.26653/2076-4650-2020-1-2-03.

**Лукьянец А. С., Рязанцев С. В., Моисеева Е. М., Маньшин Р. В., 2020б:** Экономические и социальные последствия экологической миграции в странах Центральной Азии // Центральная Азия и Кавказ. – Т. 23, Вып. 2. – С. 160-176. DOI: 10.37178/ca-c.20.2.13.

**Медоуз Д. Х., Рандерс Й., Медоуз Д. Л., 2012:** Пределы роста. 30 лет спустя. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 361 с. ISBN: 978-5-9963-1056-2.

**МЧС России, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021:** Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». URL: https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii.

**Немцов А. В., Ревич Б. А., Савельев Д. В., Клепиков П. И., 2013:** Алкогольные психозы и погодные условия в Москве в 2005-2011 годах // Вопросы наркологии. – № 2. – С. 16-26.

**Порфирьев Б. Н., 2011:** Природа и экономика: риски и взаимодействия. – М.: Анкил. – 356 с.

**Порфирьев Б. Н., 2013:** Экономическая оценка людских потерь в результате чрезвычайных ситуаций // Вопросы экономики. – № 1. – С. 48-68. DOI: 10.32609/0042-8736-2013-1-48-68.

**Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России, 2018:** Ред. А. Н. Золотокрылин, В. В. Виноградова, О. Б. Глезер. – М.: Институт географии РАН. – 154 с.

**Ревич Б. А., 2008:** Изменение здоровья населения России в условиях меняющегося климата // Проблемы прогнозирования. – № 3. – С. 140-149.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – Санкт-Петербург: ООО «Амирит». – 106 с.

**Росгидромет, 2020:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. – Москва: Росгидромет. – 97 с.

**Рязанцев С. В., 2012:** Демографическая цена лесных пожаров лета 2010 года в России / Сборник научно-популярных статей победителей конкурса РФФИ 2011 года. Вып. 15. Под редакцией члена-корреспондента РАН В. А. Шахнова. – М.: «МОЛНЕТ». – С. 321-332.

**Хаснулин В. И., Хаснулина А. В., 2012:** Психоэмоциональный стресс и метеореакция как системные проявления дезадаптации человека в условиях изменения климата на Севере России // Экология человека. – № 8. – С. 3-7.

**Black R., Arnell N., Dercon S., 2011:** Migration and global environmental change – Review of drivers of migration. Global Environmental Change, 21(Supplement 1). The Government Office for Science, London. 237 p.

**Bronson F. H., 2009:** Climate change and seasonal reproduction in mammals // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 364, № 1534, pp. 3331-3340. DOI: 10.1098/rstb.2009.0140.

**Clement V., Rigaud K. K., de Sherbinin A., Jones B., Adamo S., Schewe J., Sadiq N., Shabahat E., 2021:** Groundswell Part 2: Acting on internal climate migration. Washington, DC: The World Bank. 324 p.

**Deisenhammer E. A., 2003:** Weather and suicide: the present state of knowledge on the association of meteorological factors with suicidal behavior // Acta Psychiatrica Scandinavica, v. 108, № 6, pp. 402-409. DOI: 10.1046/j.0001-690X.2003.00209.x

**Deschênes O., Greenstone M., 2011:** Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US // American Economic Journal: Applied Economics, v. 3, № . 4, pp. 152-85. DOI: 10.1257/app.3.4.152.

**Hallegatte S., Bangalore M., Bonzanigo L., Fay M., Kane T., Narloch U., Rozenberg J., Treguer D., Vogt-Schilb A., 2016:** Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty. Climate Change and

Development. – Washington, DC: World Bank. 207 p. URL: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22787.

**Huntington E., 1913:** Changes of climate and history // The American Historical Review, v. 18, № . 2, pp. 213-232.

**IOM, 2014:** Outlook on Migration, Environment and Climate Change – Geneva, Switzerland. 144 p. URL: https://publications.iom.int/system/files/pdf/mecc_outlook.pdf.

**Legendre M., Bartoli J., Shmakova L., Jeudy S., Labadie K., Adrait A., Lescot M., Poirot O., Bertaux L., Bruley C., Couté Y., Rivkina E., Abergel C., Claverie J.-M., 2014:** Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology // Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 111, № 11, pp. 4274-4279. DOI: 10.1073/pnas.1320670111.

**Lukyanets A. S., Ryazantsev S. V., Maksimova A. S., Moiseeva E. M., Manshin R. V., 2019:** Theoretical, methodological and statistical problems of studying environmental migration // Amazonia Investiga, v. 8, № . 19, pp. 227-236.

**Maksimova A. S., Ryazantsev S. V., Lukyanets A. S., Moiseeva E. M., 2020:** Methodological bases for assessing socio-demographic and migration consequences of man-made disasters // Amazonia Investiga, v. 9, № 29, pp. 213-223. DOI: 10.34069/ai/2020.29.05.24.

**Mortreux C., Barnett J., 2009:** Climate change, migration and adaptation in Funafuti, Tuvalu // Global Environmental Change, v. 19, № 1, pp. 105-112. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.09.006.

**Nolen-Hoeksema S., Morrow J., 1991:** A prospective study of depression and posttraumatic stress symptoms after a natural disaster: The 1989 Loma Prieta earthquake // Journal of Personality and Social Psychology, v. 61, № 1, pp. 115-121. DOI: 10.1037/0022-3514.61.1.115.

**O'Neill B., MacKellar F., Lutz W., 2000:** Population and Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 267 p. DOI:10.1017/CBO9780511529450.

**Roenneberg T., Aschoff J., 1990:** Annual rhythm of human reproduction: II. Environmental correlations //Biological Rhythms, v. 5, № 3, pp. 217-239. DOI: 10.1177/074873049000500304.

**Rojansky N., Brzezinski A., Schenker J. G., 1992:** Seasonality in human reproduction: an update // Human Reproduction, v. 7, № 6, pp. 735-745. DOI: 10.1093/oxfordjournalshumrep.a137729.

**Sobotka T., Skirbekk V., Philipov D., 2011:** Economic recession and fertility in the developed world // Population and development review, v. 37, № 2, pp. 267-306. DOI: 10.1111/j.1728-4457.2011.00411.x.

**Stephenson J., Newman K., Mayhew S., 2010:** Population dynamics and climate change: what are the links? Journal of Public Health, v. 32, № 2, pp. 150-156. DOI: 10.1093/pubmed/fdq038.

**UNFPA, IIED, 2009:** Population Dynamics and Climate Change /. Edited by Guzmán J., Martine G., McGranahan G., Schensul D., Tacoli C. 238 p. URL: https://environmentalmigration.iom.int/population-dynamics-and-climate-change.

**United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020:** Asia-Pacific Regional Framework for NATECH (Natural Hazards Triggering Technological Disasters) Risk Management. 64 p. URL: https://www.undrr.org/media/48023/download.

**Van Aalst M. K., 2006:** The impacts of climate change on the risk of natural disasters // Disasters, v. 30, № 1, pp. 5-18. DOI: 10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x.

**World Health Organization, 2014:** Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. – Geneva, Switzerland. 115 p.

## 2.2.2 Трудовые ресурсы и занятость

*С. В. Рязанцев, А. С. Лукьянец, Е. М. Моисеева*

**Введение**

Самые авторитетные оценки и прогнозы, сделанные учеными на данный момент, подтверждают, что негативный эффект от климатических изменений в среднесрочной и долгосрочной перспективе затронет все отрасли экономики во всем мире, нанося колоссальный ущерб, и будет тем сильнее, чем масштабнее эти изменения (Stern, 2007; IPCC, 2014). В первую очередь, пострадают отрасли и виды экономической деятельности, где широко используются ресурсы, чувствительные к изменению климата, а именно сельское, лесное и рыбное хозяйство, пищевая промышленность, деревообрабатывающая промышленность, целлюлозно-бумажное производство, некоторые виды фармацевтической и химической промышленности, экологический туризм, возобновляемая энергетика. По оценкам Международной организации труда (МОТ), в России такие рабочие места составляют около 14% (ILO, 2018a, с. 18).

Изменение климата способно оказывать влияние на трудовые ресурсы и занятость за счет:

– роста числа и масштабов опасных природных явлений, которые могут становиться причиной временной нетрудоспособности, инвалидности или гибели людей трудоспособного возраста, миграции населения, а также разрушения производственной инфраструктуры, рабочих мест и т.п.;

– ухудшения природно-климатических условий, что будет создавать риски для здоровья работников и вести к снижению их работоспособности и производительности труда;

– структурных сдвигов на рынке труда, обусловленных изменениями климата и необходимостью адаптации к нему различных отраслей хозяйства.

В данной главе будут рассмотрены все эти компоненты в отдельности и степень их воздействия на занятость и рынок труда в России. Разработка методологии для их совокупной количественной оценки является возможным направлением для дальнейших исследований по данной проблеме. К настоящему времени вопросы трансформации рынка труда в контексте глобального изменения климата и мер, направленных на борьбу с ним, получили значительное внимание в зарубежной науке (см., напр., Kjellstrom et al., 2009; Graff Zivin, Neidell, 2014 и др.) и деятельности международных организаций, в особенности агентств ООН (см., напр., ILO, 2018a; McKinnon et al., 2016 и др.). В нашей стране комплексных исследований, посвященных данной теме, пока представлено не было, за исключением отдельных статей (см., напр., Войкина, Потравный, 2018; Вередюк, 2011 и др.). Однако имеются серьезные исследования, посвященные перспективам развития отдельных секторов экономики России, таких как энергетика, переработка отходов и т.д., и социально-экономического развития страны в целом в условиях изменения климата и необходимости адаптации к нему (см., например, Порфирьев и др., 2020; Экономические аспекты модернизации, 2020; Порфирьев, 2008; и др.). В то же время, согласно имеющимся данным и прогнозам, рынок труда России под воздействием глобального изменения климата и новых мер экологической политики в ближайшие десятилетия столкнется с более серьезными изменениями, чем рынок труда большинства европейских стран.

### 2.2.2.1 Опасные природные явления и труд

Частота и масштаб гидрометеорологических опасных явлений (ОЯ) увеличиваются по мере изменения климата (IPCC, 2014). Они наносят огромный ущерб экономике. Так, по данным Министерства чрезвычайных ситуаций Российской Федерации, за период 2015-2019 гг. прямой материальный ущерб от чрезвычайных ситуаций природного характера составлял в среднем 9,6 млрд руб. в год и в совокупности был равен примерно 0,01% национального валового внутреннего продукта (ВВП) за эти годы (МЧС, 2020, 2019, 2018, 2017, 2016). При этом, по мнению ряда авторитетных экспертов, эти данные не соответствуют действительности и на порядок недооценивают реальный ущерб. Так, согласно оценкам Б. Н. Порфирьева, этот ущерб в действительности составляет порядка 0,5% ВВП (Порфирьев, 2016). Кроме того, ОЯ наносят и косвенный ущерб, который определить и оценить еще труднее. При этом расходы России на снижение рисков природных катастроф и улучшение экологической ситуации на современном этапе сравнительно невелики. В частности, текущие затраты на охрану окружающей среды за тот же период, по данным Росстата, составили в среднем 327,65 млн руб. в год[1].

Помимо прямого материального ущерба ОЯ наносят ущерб здоровью людей, в том числе людям трудоспособного возраста, а иногда приводят к их смерти (см. главу 2.2.1). Они также разрушают объекты инфраструктуры, прерывают процесс производства, уничтожают рабочие места и вынуждают людей мигрировать, замедляя тем самым экономическую активность. Хотя восстановление основных фондов после стихийного бедствия в краткосрочной перспективе может стимулировать рост ВВП и занятости, исследования доказывают, что в среднесрочной и долгосрочной перспективе экономические последствия ОЯ остаются негативными, особенно для развивающихся и переходных экономик (Порфирьев, 2016; Felbermayr, Gröschl, 2014; Noy, 2014).

По оценкам МОТ, из-за ОЯ, которые могли быть вызваны или усугублены деятельностью человека[2], в период 2000-2015 гг. в мире было потеряно 23 млн трудовых лет в среднегодовом выражении[3]. Россия по данному показателю занимает пятое место среди стран Большой двадцатки (см. рис. 2.2.2.1). При этом значение данного показателя для России повысилось за период 2008-2015 гг. по сравнению с периодом 2000-2007 гг. (с менее 0,5 до более 1,5 года на одного человека). Это может свидетельствовать не только о росте числа ОЯ на территории России, но о трудностях и неэффективности решения проблем занятости в пострадавших регионах, большинство из которых являются экономически неблагополучными (дотационными). Потери рабочего времени в результате опасных природных явлений или спровоцированных

[1] Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Текущие (эксплуатационные) затраты на охрану окружающей среды с 2017 г. URL: https://fedstat.ru/indicator/58607.

[2] Метеорологические ОЯ (штормы, туман, экстремальные температуры), гидрологические ОЯ (наводнения, оползни, воздействие волн), климатологические ОЯ (засуха, прорывы ледниковых озер, лесные пожары), определенные биологические ЧС (заражение инфекционными заболеваниями, переносимыми насекомыми) и определенные техногенные катастрофы (промышленные аварии, спровоцированные природными ОЯ).

[3] Под потерянными трудовыми годами понимается время, которое потребовалось пострадавшим или потерявшим работу в результате стихийного бедствия, чтобы вернуться к нормальной трудовой деятельности. Для погибших число потерянных трудовых лет рассчитывалось как разница между возрастом смерти и возрастом выхода на пенсию в стране (ILO, 2018b, с. 160).

ими аварий на территории Российской Федерации сравнительно невысоки, но все же значимы и являются одним из важных компонентов прямого экономического ущерба, наносимого природными и природно-техногенными катастрофами.

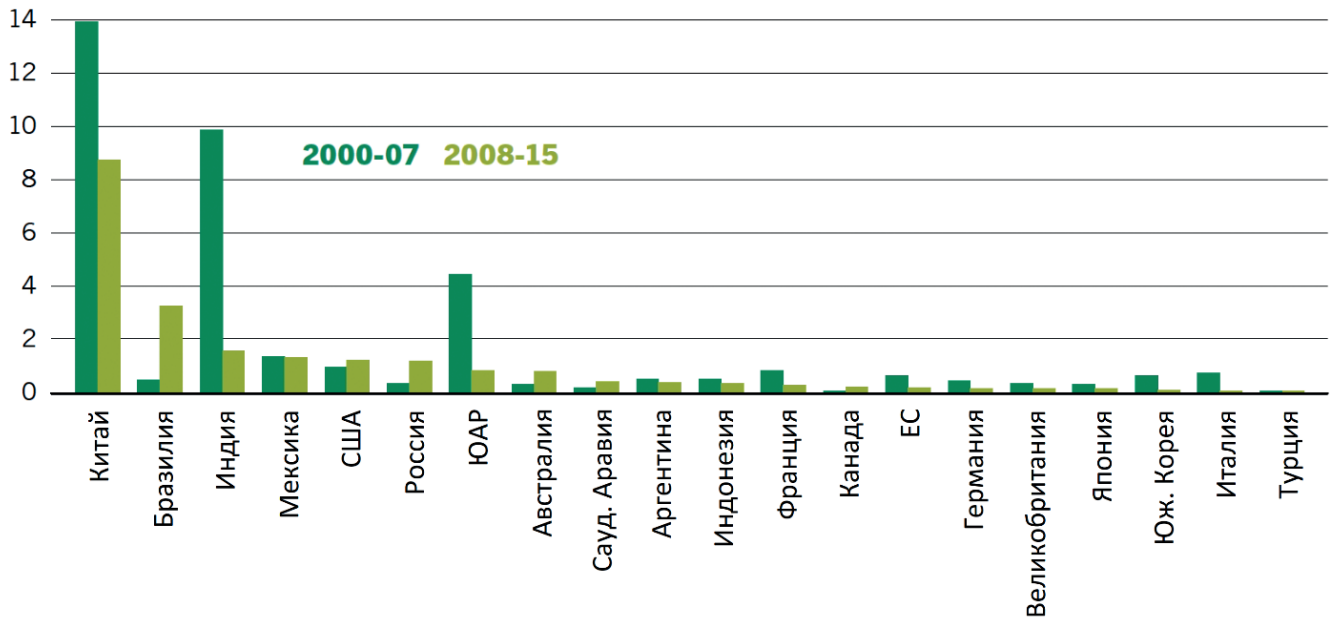



***Рис. 2.2.2.1*** *Число трудовых лет (на 1 чел. в год), потерянных в результате природных или природно-техногенных катастроф, связанных с изменением климата, по странам Большой двадцатки за 2000-2007 гг. и 2008-2015 гг.*
*Источник: ILO (2018a), с. 15*

### 2.2.2.2 Производительность труда

Даже если негативные эффекты изменения климата не вызывают полной остановки трудовой деятельности, они способны снижать ее эффективность (Ревич, Григорьева, 2021). Согласно последним оценкам МОТ, температуры выше 24-26 °C приводят к снижению производительности труда; при температуре 33-34 °C работники теряют 50% производительности; температуры выше 39 °C могут привести к смерти. Даже в случае реализации оптимистического сценария изменения климата RCP2.6, то есть если к концу XXI века рост глобальной температуры составит не более 1,5 °C, согласно среднему прогнозу, уже в 2030 г. из-за жары будут наблюдаться потери производительности труда, эквивалентные 2,2% от общего числа рабочих часов во всем мире, что эквивалентно 80 млн рабочих мест с полной занятостью, или 2400 млрд долларов США в денежном выражении (ILO, 2018a).

Волны тепла будут способствовать снижению продуктивности у работников всех секторов, но особенно высоки риски на местах, связанных с физическим трудом или работой на улице, то есть для работников сельского, лесного, рыбного хозяйства, добывающей промышленности, строительства, транспорта, коммунального хозяйства, туризма, спортивной индустрии. При условии плохого кондиционирования страдать будут даже люди, работающие внутри помещений: фабрик, заводов, мастерских. Продуктивность работы в офисах, связанной с умственным трудом, также будет снижаться по причине психической усталости, вызванной жарой. Следует

заметить, что сильнее всего высокие температуры будут сказываться на жителях крупных городов, где из-за роста численности населения и уровня индустриализации расширяются так называемые «острова тепла» (IPCC, 2014).

Несмотря на то что на территории Российской Федерации скорость потепления значительно превосходит среднюю по земному шару (см. раздел 1.2), ее подверженность воздействию экстремально высоких температур остается сравнительно низкой, поскольку бóльшая часть страны расположена в северных широтах. Наибольшую угрозу при этом составляют волны тепла, т.к. средняя многолетняя температура (климатическая норма) в среднем не превышает 24 °C. Кроме того, доля населения, занятого в сельском, лесном и рыбном хозяйстве, в среднем по стране опять же сравнительно невелика и, по данным Росстата за 2020 г., составляет 6%; еще 2,3% заняты в добыче полезных ископаемых, 14,2% – в обрабатывающей промышленности, и 6,6% – в строительстве. Таким образом, потери производительности труда, связанные с тепловыми нагрузками, в среднесрочной перспективе для России будут невелики. По оценкам МОТ, к 2030 г. они составят 0,01% всех рабочих часов, что эквивалентно 4,3 тыс. рабочих мест с полной занятостью и близко к статистической погрешности (см. табл. 2.2.2.1).

***Таблица 2.2.2.1***

*Потери рабочего времени из-за тепловой нагрузки в России по секторам экономики на 2030 г.*[1]

| Отрасль экономики | Потери рабочего времени | |
|---|---|---|
| | доля от общего числа рабочих часов (%) | эквивалент рабочих мест с полной занятостью (тыс.) |
| Сельское хозяйство | 0,03 | 1,5[2] |
| Промышленность | 0,01 | 1,2[2] |
| Строительство | 0,03 | 1,6[2] |
| Обслуживание | 0 | 0[2] |
| Всего | 0,01 | 4,3[2] |

*Примечание*: [1] При сценарии роста глобальной температуры на 1,5 °C к концу XXI века; источник: ILO (2019), с. 68;

[2] Рассчитано на основе оценок ILO и данных Росстата о структуре занятого населения по видам экономической деятельности

Однако нельзя забывать, что данные прогнозы могут измениться в негативную сторону при условии реализации менее благоприятного сценария изменения климата. Так, согласно докладу Европейской комиссии, при реализации сценария RCP8.5 (если рост глобальной температуры достигнет 4 °C в 2081-2100 гг.) в южных регионах Европы к концу столетия потери производительности труда составят до 15, а в северных регионах – до 4% (Gosling et al., 2018).

[1] Трудовые ресурсы. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстата). URL: https://rosstat.gov.ru/labour_force.

Экономический ущерб, таким образом, станет ощутимым, а кроме того, это будет означать усиление нехватки рабочей силы, которое и без того наблюдается в Российской Федерации вследствие снижения численности населения трудоспособного возраста.

Кроме этого, падение производительности труда, утрата трудоспособности и возможная инвалидность могут быть вызваны не только экстремально высокими температурами, но и другими негативными воздействиями климатических изменений на здоровье населения (см. главы 2.2.3 и 2.2.4). С учетом климатических особенностей на территории России, можно прогнозировать, что значительные риски в этом плане будет представлять рост числа случаев инфекционных заболеваний, в особенности тяжелых, таких как клещевой энцефалит или геморрагические лихорадки. Изменение условий окружающей среды ведет к осложнению течения и исходов других заболеваний, в частности COVID-19, который показал, сколь огромный ущерб способны наносить эпидемии и пандемии (Ревич, 2021).

Наконец, снижение продуктивности отдельных отраслей экономики и производительности труда людей, занятых в них, может стать дополнительной причиной миграции населения. Прежде всего это касается стран с высокой долей сельского хозяйства в ВВП, где снижение урожайности ведет к росту бедности населения (Hallegatte et al., 2016). Такая ситуация наблюдается, в частности, в большинстве стран Центральной Азии. Для этого региона характерен засушливый и полузасушливый континентальный климат с высокими летними температурами. Согласно имеющимся прогнозам, к концу века рост среднегодовых температур в этих странах может превысить 5 °C (Kattsov et al., 2008). Доля занятых в сельском хозяйстве Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана, Узбекистана в среднем превышает 25%[1]. Соответственно, потери производительности труда для этих республик будут более заметными и, по прогнозам МОТ (при условии роста глобальной температуры на 1,5 °C до конца века) к 2030 г. составят в среднем 0,1% всех рабочих часов. Выше всего они будут в Туркменистане – 0,2, Узбекистане – 0,15, и Таджикистане – 0,12% (ILO, 2019, с. 69). Эта ситуация будет способствовать интенсификации потоков трудовой миграции из стран Центральной Азии в Россию, однако их прогнозируемый рост, вследствие изменения климата, по нашим оценкам, до 2050 г. не превысит в среднем 4-5 тыс. человек в год (см. главу 2.2.1), что не способно вызвать значимых изменений на рынке труда России. Учитывая наблюдающийся уже сегодня дефицит рабочей силы в стране, это можно рассматривать как благо и для России, и для государств Центральной Азии, где, напротив, темпы роста населения опережают скорость создания новых рабочих мест в экономике. Однако трудовую миграцию нельзя считать «панацеей» для российского рынка труда. Как показала пандемия COVID-19, приток иностранных рабочих не всегда будет стабилен. Особенно опасно полагаться на него в условиях катаклизмов, будь то биологического или климатического характера.

Таким образом, в случае реализации благоприятного сценария изменения климата потери производительности труда на территории Российской Федерации будут пренебрежимо малы, однако при реализации неблагоприятно-

[1] World Bank Open Data. URL: https://data.worldbank.org.

го сценария к концу XXI века они могут обернуться серьезной проблемой для рынка труда и экономики страны в целом. В случае заметного снижения производительности труда предприятия могут либо нанять больше работников, либо увеличить продолжительность рабочего дня, либо наращивать механизацию, чтобы заместить труд основным капиталом. Любая из этих мер потребует дополнительных затрат, с учетом того, что роста предложения рабочей силы на рынке труда России нельзя ожидать по причине сокращения численности населения трудоспособного возраста. Из-за дефицита рабочей силы конкуренция среди нанимателей будет возрастать, и в конечном итоге далеко не все предприятия смогут получить большее число работников при условии падения производительности их труда.

### 2.2.2.3 Структурные изменения на рынке труда

Считается, что переход к экологически ориентированной экономике и снижение выбросов парниковых газов помогут сократить затраты на адаптацию к последствиям изменения климата в будущем (De Bruin et al., 2009). Но также данные меры будут способствовать перераспределению рабочей силы на рынке труда, созданию новых рабочих мест в одних отраслях и сокращению числа рабочих мест в других. Согласно научным исследованиям, международным соглашениям и экологическим программам, принятым в большинстве развитых стран, как и в самой России, эти изменения будут касаться прежде всего перехода к устойчивой энергетике, устойчивому сельскому хозяйству и экономике замкнутого цикла. Ниже будет рассмотрено предполагаемое воздействие трансформаций в каждой из этих сфер на рынок труда в России и других странах мира.

«Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех» является одной из целей устойчивого развития ООН»[1]. Кроме того, выполнение основной цели Парижского соглашения, к которому Россия присоединилась в 2019 г., – не допустить роста среднегодовой глобальной температуры более чем на 1,5-2 °C – предполагает снижение выбросов парниковых газов, переход к «зеленой» экономике и достижение так называемой климатической нейтральности к середине XXI века. В то же время результаты некоторых моделей показывают, что выполнение Россией и другими странами этих целей приведет к падению спроса на нефть и газ и быстрому падению прибыльности этих отраслей, в результате чего темпы прироста российского ВВП к 2030 г. снизятся на 0,2-0,3 процентных пункта по сравнению с базовым сценарием (Зеленый поворот, 2021, с. 39-44). Соответственно, по мере сокращения нефтегазового сектора будут снижаться число рабочих мест в данной отрасли и падать спрос на рабочую силу. По данным мониторинга за январь – июль 2020 г., в нефтегазовом секторе России было занято более 565 тыс. человек (Мониторинг рынка труда, 2020). По оценкам МОТ, при условии перехода к устойчивой энергетике к 2030 г. в среднем по миру снижение спроса на рабочую силу может достигнуть 0,1% в добыче нефти и газа и 0,2% в добыче угля (см. табл. 2.2.2.2).

[1] Цели в области устойчивого развития ООН. Цель 7. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/.

***Таблица 2.2.2.2***

*Сектора мировой экономики, на занятость в которых повлияет переход к устойчивой энергетике**

| Сектора, в которых ожидается рост спроса на рабочую силу | Рост спроса, % | Сектора, в которых ожидается падение спроса на рабочую силу | Паде-ние спроса, % |
|---|---|---|---|
| Солнечная термальная энергетика | 3,0 | Угольная энергетика | –0,19 |
| Геотермальная энергетика | 0,4 | Добыча сырой нефти | –0,11 |
| Ветроэнергетика | 0,4 | Добыча другого нефтегазового сырья | –0,11 |
| Атомная энергетика | 0,3 | Переработка нефти | –0,08 |
| Энергетическая утилизация отходов | 0,3 | Производство и транспортировка газа | –0,05 |
| Солнечная фотоэлектрическая энергетика | 0,3 | Добыча угля и торфа | –0,03 |
| Гидроэнергетика | 0,2 | Добыча природного газа | –0,03 |

*На 2030 г. при условии перехода к сценарию устойчивого развития по сравнению с инерционным сценарием развития.

Источник: ILO (2018b), с. 44

Однако параллельно с этим повысится спрос на рабочую силу и появятся новые рабочие места в отраслях, связанных с возобновляемыми источниками энергии, а также в атомной энергетике. Кроме этого, инвестиции в инфраструктуру, необходимую для перехода к устойчивой энергетике, будут способствовать созданию новых рабочих мест в таких отраслях, как строительство, наука и технические разработки. По прогнозам, на каждый миллион долларов таких инвестиций в России появится 120 новых рабочих мест (ILO, 2018a, с. 24). И все же оценки свидетельствуют, что при условии перехода стран мира к устойчивой энергетике в России количество потерянных рабочих мест будет превышать число созданных: по прогнозам МОТ, в сумме Россия потеряет больше рабочих мест, чем любая другая страна Большой двадцатки (см. рис. 2.2.2.2).

Особенно велики риски для моногородов, где предприятия по добыче угля или нефтегазового сырья являются градообразующими. Например, в Кемеровской области, где в 2018 г. на добычу угля пришлось 38,2% валового регионального продукта[1]. Сокращение объемов потребления ископаемого топлива для таких регионов будет означать не только наступление экономической депрессии и ухудшение ситуации на рынке труда,

[1] Администрация Правительства Кузбасса (2020). Пояснительная записка к прогнозу социально-экономического развития Кемеровской области на 2020 год и на плановый период до 2024 года. URL: https://ako.ru/deyatelnost/strategicheskoe- planirovanie-kemerovskoy-oblasti-.php.

но и катастрофическую депопуляцию. Поэтому крайне важно заблаговременно принять меры по диверсификации экономики, технологической трансформации и модернизации, прежде всего энергетического сектора экономики страны и «добывающих» регионов.

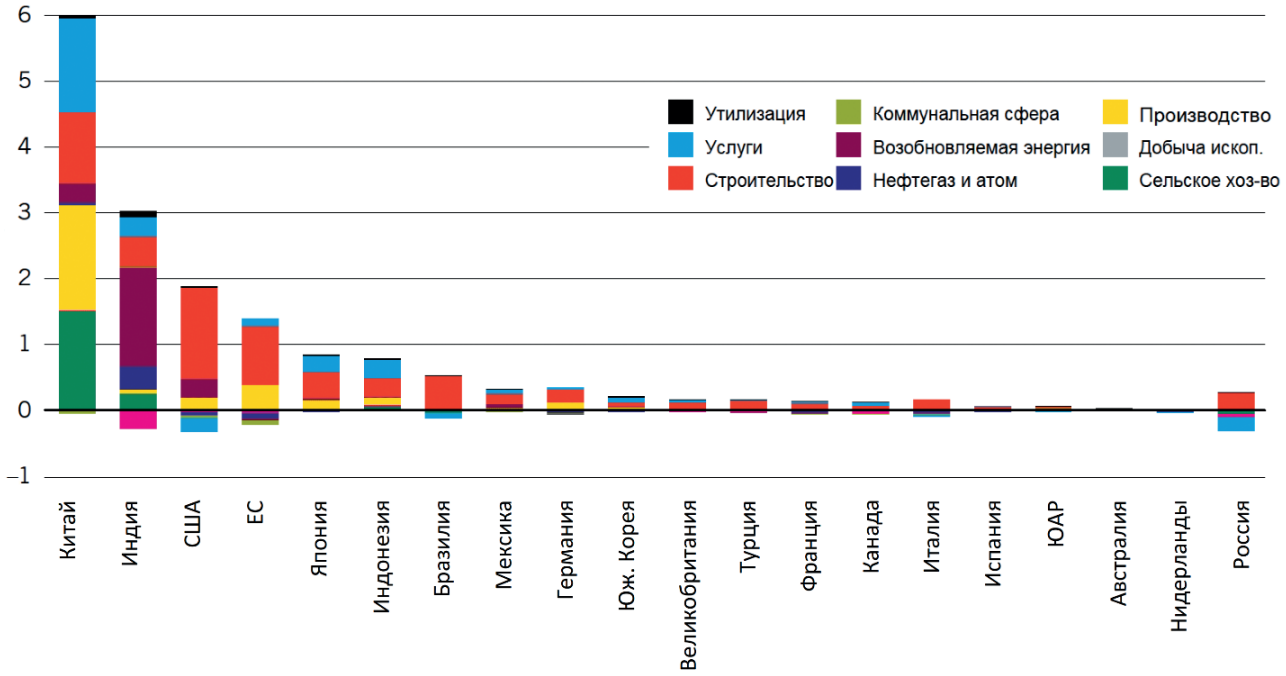



***Рис. 2.2.2.2*** *Прогноз изменения числа рабочих мест при условии перехода к устойчивой энергетике в странах Большой двадцатки на 2030 г. (млн рабочих мест)*[1]

*Источник: ILO (2018a), с. 22*

В ведущих экономиках мира (США, ЕС, Китай, Япония) порядка 1/3 ВВП уже сегодня обеспечивает «экономика знаний» (наука, образование, здравоохранение, культура). В России же доля этих отраслей составляет всего около 13%. На фоне такого технологического отставания в гражданском секторе экономики низка доля инвестиций в основной капитал (всего порядка 20%). Ведущие российские экономисты не раз отмечали, что модернизация отраслевой структуры экономики и повышение объема инвестиций в человеческий капитал, современные технологии и науку способны обеспечить и увеличение производительности, и уменьшение ресурсозатрат, и повышение экологичности производства, в том числе снижение выбросов парниковых газов и вредных веществ. При этом наибольшую отдачу могут обеспечить именно инвестиции в топливно-энергетический комплекс, модернизация которого будет способствовать не только продвижению России по пути достижения энергоэффективности и диверсификации источников энергии, но обеспечит также и дополнительный рост ВВП. В частности, учеными отмечалось, что большие перспективы в кратко- и среднесрочной перспективе имеют замещение угля более «климатически благоприятным» природным газом

[1] Прогноз построен на «сценарии устойчивого развития» Международного энергетического агентства, предполагающем ограничение роста глобальной температуры до 2 °C к концу века (World Energy Outlook, 2020), а также прогнозе продаж электромобилей (UBS Research, 2017). Кроме этого, предполагается, что все сбережения, полученные за счет повышения энергоэффективности, инвестируются в модернизацию инфраструктуры.

и увеличение доли электроэнергетики также за счет газа, развития АЭС и возобновляемых источников энергии (Порфирьев, 2020).

Итак, в структуре выбросов парниковых газов сегодня доминирует энергетический сектор. В 2018 г. на его долю пришлось 79% всех выбросов на территории России. Источником еще 11% выбросов являются промышленные процессы, 6% парниковых газов производит сельское хозяйство, и 4% – отходы (Национальный кадастр, 2020). Помимо этого, сельскохозяйственная деятельность может оказывать заметное влияние на состояние почв, водоемов, вырубку лесов, а отходы могут являться серьезным источником загрязнения и вредных веществ. Таким образом, ставя перед собой цель сокращения выбросов и достижения климатической нейтральности, а также улучшения экологической ситуации, страна должна использовать возможности, связанные с переходом к устойчивому сельскому хозяйству и циклической экономике. Однако трансформация этих отраслей аналогичным образом вызовет изменения на рынке труда, в ходе которых рабочие места в одних секторах будут потеряны, а в других созданы.

Устойчивость сельского хозяйства подразумевает обеспечение экологической безопасности, возобновляемости и устойчивости ресурсов. Поэтому наибольший рост спроса на рабочие места в мире прогнозируется в секторах, связанных с компостированием отходов, а также с «чистой» энергетикой и отчасти с научными исследованиями в данной сфере. При этом в среднем по миру наиболее вероятно сокращение спроса на рабочую силу в выращивании различных сельскохозяйственных культур (см. табл. 2.2.2.3).

***Таблица 2.2.2.3***

*Сектора мировой экономики, на занятость в которых повлияет переход к устойчивому сельскому хозяйству*[1]

| Сектора, в которых ожидается рост спроса на рабочую силу | Рост спроса, % | Сектора, в которых ожидается падение спроса на рабочую силу | Падение спроса, % |
|---|---|---|---|
| Компостирование бумаги и дерева | 0,12 | Выращивание сахарного тростника, сахарной свеклы | –0,08 |
| Солнечная фотоэлектрическая энергетика | 0,06 | Выращивание хлопковых культур | –0,08 |
| Компостирование пищевых отходов | 0,05 | Зерноводство | –0,08 |
| Скотоводство | 0,01 | Рисоводство | –0,07 |
| Энергетика | 0,01 | Овощеводство | –0,07 |
| Исследования и разработки | 0,01 | Выращивание злаков | –0,07 |
| Птицеводство | – | Выращивание пшеницы | –0,06 |

[1] На 2030 г. при условии перехода к сценарию устойчивого развития по сравнению с инерционным сценарием развития. Источник: ILO (2018b), с. 50

Исходя из сложившегося на сегодняшний день распределения рабочей силы между этими секторами, больше рабочих мест в России, опять же, будет потеряно, чем создано. Однако потенциальный ущерб от негативных последствий изменения климата в долгосрочной перспективе может превзойти эти потери. Так, например, уже в 2010 и 2012 гг. засухи привели к сокращению производства зерна на 33 и 25% соответственно. По некоторым прогнозам, к 2050 г. снижение средней урожайности в России, обусловленное климатическими условиями, может составить 17%, или 13,4 млн тонн зерновых, что приведет к экономическому ущербу, равному 3,9 млрд долларов США ежегодно (Сафонов, Сафонова, 2013). Эти данные описывают крайний негативный сценарий в сочетании с полным отсутствием каких-либо мер по адаптации сельского хозяйства. Но все же, с учетом таких потенциальных рисков, для России, как и для других стран, представляется экономически целесообразным уже сегодня начать модернизацию и трансформацию сельского хозяйства в сторону обеспечения его устойчивости и создания новых рабочих мест в секторах, развитие которых способствует достижению данной цели.

Наконец, переход к экономике замкнутого цикла, или циклической экономике, подразумевает рациональное использование природных ресурсов, расширение переработки вторичного сырья и использование возобновляемых источников энергии. Соответственно, переход к данной модели экономического развития будет означать сокращение, в первую очередь, спроса на рабочую силу в отраслях, связанных с углеводородной энергетикой, и рост спроса на рабочую силу в секторах, связанных с переработкой и «чистой» энергией. Прогнозы МОТ свидетельствуют, что переработка вторичного сырья может быть довольно перспективной отраслью как в плане получения прибыли, так и в плане создания новых рабочих мест (см. табл. 2.2.2.4).

***Таблица 2.2.2.4***

*Сектора мировой экономики, на занятость в которых повлияет переход к экономике замкнутого цикла*[1]

| Сектора, в которых ожидается рост спроса на рабочую силу | Рост спроса, % | Сектора, в которых ожидается падение спроса на рабочую силу | Падение спроса, % |
|---|---|---|---|
| Переработка вторичного свинца, в т. ч. в цинк и олово | 15,0 | Угольная энергетика | –0,9 |
| Переработка вторичных драгоценных металлов | 11,2 | Добыча сырой нефти и связанные с этим услуги | –0,9 |
| Солнечная фотоэлектрическая энергетика | 4,9 | Добыча и переработка другого нефтегазового сырья | –0,9 |
| Переработка вторичной меди | 4,3 | Нефтепереработка | –0,8 |
| Переработка вторичных древесных материалов | 4,2 | Производство и транспортировка газа | –0,8 |
| Переработка вторичной стали | 3,1 | Добыча угля и торфа | –0,8 |
| Переработка вторичного алюминия | 2,7 | Добыча природного газа и связанные с этим услуги | –0,8 |

[1] *На 2030 г. при условии перехода к сценарию устойчивого развития по сравнению с инерционным сценарием развития. Источник: ILO (2018b), с. 52*

Научные исследования доказывают, во многих случаях переработка изделий, завершивших свой жизненный цикл, оказывается более выгодной, чем производство товаров из первичного сырья (см., например, Экономические аспекты модернизации, 2020; Nelen et al., 2014; Sandin, Peters, 2018 и др.). Утилизация отходов может стать полноценным видом экономической деятельности, который генерирует значительные доходы, способствует созданию новых производств, новых рабочих мест и внедрению новых технологий, при этом сберегая природные ресурсы и энергию. Также он подразумевает формирование соответствующей инфраструктуры, что сопряжено с появлением дополнительных рабочих мест в строительной отрасли. Поэтому с большой степенью уверенности можно заключить, что инвестиции в развитие данной сферы в среднесрочной и долгосрочной перспективе будут окупаемы как напрямую, так и косвенно, поскольку они позволят не только сократить расходы предприятий, но и создать новые рабочие места, а также внесут вклад в сокращение выбросов парниковых газов и борьбу с изменением климата. Однако развитие сектора переработки твердых коммунальных отходов в России на современном этапе имеет ряд особенностей, связанных с так называемыми накопленными проблемами роста, поэтому для обеспечения его развития без серьезных рисков для других производств и уровня жизни населения в целом потребуются большие научные исследования (Киршин, 2014).

### 2.2.2.4 Наиболее уязвимые группы населения

Изменение климата, как и другие события и явления, порождающие риски и негативные изменения в социально-экономической сфере, в равной степени угрожает различным группам населения. Наиболее уязвимыми оказываются беднейшие слои населения, сельские жители, рабочие-мигранты, женщины, коренные малочисленные народы, жители моногородов, где градообразующими являются предприятия нефтегазовой или угольной промышленности.

Бедные регионы и бедные люди обладают меньшими возможностями по адаптации к изменению климата и вызванным им изменениями в социально-экономической сфере (Hallegatte et al., 2016). Бедные регионы не производят достаточно дохода и не получают достаточно инвестиций, чтобы делать вложения из местного бюджета в модернизацию отраслей, от которых зависит успешность их развития в условиях изменения климата в будущем. Беднейшие слои населения не имеют достаточно средств, чтобы инвестировать их в получение новых навыков, освоение новых специальностей, переоснащение принадлежащих им сельскохозяйственных земель, а иногда и в смену места жительства или отправку на заработки в другой регион одного из членов семьи. Таким образом, они оказываются в «ловушке бедности».

Население, занятое в сельском хозяйстве, и жители «добывающих» моногородов подвержены рискам, поскольку их занятость напрямую зависит от природно-климатических условий и мер по адаптации национальной экономики к глобальному изменению климата. Согласно имеющимся прогнозам, трансформация рынка труда, обусловленная данными факторами, вызовет наибольшее сокращение числа рабочих мест именно в этих отраслях.

Значительное число иностранных работников из стран Центральной Азии, а также Восточной и Юго-Восточной Азии (Вьетнам, Китай) занято

в России в сельском и лесном хозяйстве, промышленном производстве и строительстве, то есть в тех отраслях, где особенно велики риски для здоровья, связанные с неблагоприятными условиями окружающей среды (Рязанцев, Письменная, 2019). В то же время иностранные работники зачастую имеют ограниченный доступ к услугам здравоохранения, а также в среднем худшие условия труда и проживания, чем граждане страны (Рязанцев и др., 2020). Такое положение рабочих-мигрантов не только является гуманитарной проблемой, но и создает дополнительные риски в плане снижения производительности труда под воздействием изменения климата в тех отраслях экономики, где заняты мигранты.

Также в научном сообществе существует консенсус относительно того, что изменение климата и адаптация к нему будут способствовать усилению гендерного неравенства на рынке труда (см., например, Nellemann et al., 2011). Во многих развивающихся и переходных экономиках доля неформальной занятости особенно велика среди женщин. По статистике, женщины чаще, чем мужчины, трудятся в качестве неоплачиваемых семейных работников. Кроме того, они получают меньшую заработную плату, чем мужчины, при прочих равных условиях (Женщины в сфере труда, 2016). Эта ситуация наблюдается также по отдельным отраслям экономики и отдельным регионам России (Бурханова и др., 2018). Поэтому трансформация экономики страны в ходе ее перехода к устойчивому развитию и связанная с этим трансформация рынка труда угрожают ухудшить условия труда и уменьшить заработки женщин в большей степени, чем мужчин.

Наконец, традиционные формы хозяйственной деятельности коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока России, такие как оленеводство, охота, рыбный промысел и земледелие, также окажутся под ударом по мере усугубления глобального изменения климата (см. главу 2.2.1). Это грозит не только необходимостью поиска новых форм занятости для представителей данных народов, но утратой их национальных культур.

Таким образом, для социально-экономической адаптации к последствиям климатических изменений необходимы выработка программ социальной защиты наиболее уязвимых групп населения или расширение и уточнение уже имеющихся программ и инициализация общественного диалога (Duraiappah, 1998). Развитие данных направлений, помимо сокращения бедности и неравенства, будет способствовать созданию дополнительных рабочих мест, что полностью соответствует задаче достижения устойчивого развития.

**Заключение**

Изменение климата уже в ближайшем будущем (к 2030 г.) может начать оказывать определенное негативное влияние на занятость населения России. При этом меры, направленные на снижение рисков и смягчение последствий климатических изменений, будут создавать дополнительное давление на рынок труда с учетом особенностей экономической специализации регионов и большой доли сырьевых отраслей в ВВП страны.

Адаптация к изменению климата станет важнейшим фактором изменения занятости в различных секторах экономики. В целом она будет связана с модернизацией, повышением уровня технической оснащенности и безопасности производств и объектов инфраструктуры. Так, например, инвестиции в снижение ущерба

от природных катастроф могут быть направлены на ремонт объектов ЖКХ, создание средств защиты объектов инфраструктуры и населения, таких как дамбы, плотины, системы оповещения и т.д. В топливно-энергетическом комплексе адаптация и смягчение последствий изменения климата предусматривает реализацию мер по повышению энергоэффективности экономики и диверсификации источников энергии, в том числе расширение использования природного газа, атомной энергии, энергии возобновляемых источников, совершенствование систем электроэнергетики и хранения энергии, повышение стандартов энергоэффективности в строительстве зданий. В сельском хозяйстве в рамках адаптации необходим переход к рациональному природопользованию, выбору наилучших из доступных технологий, интенсификации производства. Большие возможности для создания новых рабочих мест, развития технологий, максимизации доходов производств потенциально несет модернизация сектора обращения отходов.

Необходимо отметить, что все подобные структурные преобразования экономики несут в себе не только новые возможности, но и риски для российской экономики и общества. Мировой опыт показывает, что чем ниже уровень экономического и технологического развития страны, тем меньше у нее возможностей безболезненно совершить переход к «зеленой» экономике. Чем ниже уровень структурно-технологической модернизации, тем более значительными будут снижение темпов роста ВВП и уровня жизни населения при «зеленом повороте» и тем больше будут потери рабочих мест. К сожалению, технологическое отставание России от ведущих экономик мира пока остается заметным, что необходимо принимать в расчет при разработке мер по борьбе с изменением климата и смягчению его последствий. При разработке конкретных инвестиционных проектов применительно к каждому отдельному сектору экономики и региону России необходимо проведение соответствующих расчетов и технико-экономических обоснований.

В целом для достижения хотя бы нейтрального эффекта для рынка труда в условиях необходимости выполнения по крайней мере своих обязательств по Парижскому соглашению России необходимо во главу угла ставить инвестиции в основной капитал, человеческий капитал, технологии и инновации, развитие перерабатывающих и информационных отраслей экономики.

Также следует отметить, что методология оценки климатических рисков и ущерба, наносимого изменением климата и опасными природными явлениями различным отраслям экономики, требует совершенствования. В настоящее время издержки, вызванные природно-климатическими факторами, в экономической отчетности относятся в категорию «прочие расходы». Методики оценки ущерба не включают многие отложенные косвенные последствия, в том числе последствия для рынка труда и занятости населения. Подобная практика приводит к недооценке опасности изменения климата для хозяйственной деятельности и благосостояния населения.

## Список литературы


**Бурханова Ф. Б., Асадуллина Г. Р., Садретдинова Э. В., Сизоненко З. Л., Шаяхметова Р. Р., 2018:** Неформальная занятость женщин: практики, социальные риски и возможности / Работающая женщина: возможности профессиональной реализации vs дискриминационные практики (опыт постсоветского пространства): сборник материалов Междунар. науч.-практич. конф./ под общ. ред. И. В. Фроловой. – Уфа: Мир печати. – С. 64-87.

**Вередюк О. В., 2011:** Влияние изменения климата на занятость // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – № 4. – С. 2-29.

**Войкина Е. А., Потравный И. М., 2018:** Зеленая занятость и рынок труда в условиях формирования экологически ориентированной экономики // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика – № 2. – С. 217-236.

**Женщины в сфере труда: Тенденции 2016:** Международное бюро труда. – Женева. – 14 с. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/dgreports/dcomm/publ/documents/publication/wcms_457097.pdf.

**Зеленый поворот. Изменение климата как вызов и уникальная возможность для технологической трансформации России и обеспечения соблюдения экологических прав граждан, 2021:** Доклад Постоянной комиссии по экологическим правам Совета при Президенте Российской Федерации по развитию гражданского общества и правам человека. – М.: Climatescience.ru. – 130 с. URL: https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/direct/424525029.pdf.

**Киршин И. А., 2014:** Экологические ограничения современного экономического роста // Проблемы прогнозирования. – № 3. – С. 86-95.

**Мониторинг рынка труда в нефтегазовом комплексе, 2020:** Совет по профессиональным квалификациям в нефтегазовом комплексе. URL: https://www.spkngk.ru/fileadmin/f/about/Monitoring_rynka_truda_v_ngk_2020.pdf.

**МЧС России, 2020, 2019, 2018, 2017, 2016:** Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». URL: https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2020-god.

**Национальный кадастр антропогенных выбросов, 2020:** Институт глобального климата и экологии. URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/rus-2020-nir-15apr20.zip.

**Порфирьев Б. Н., 2020:** Климат, устойчивое развитие и экономический рост: приоритеты решений для России / Экономическая политика России в межотраслевом и пространственном измерении. Материалы второй конференции ИНП РАН и ИЭОПП СО РАН по межотраслевому и региональному анализу и прогнозированию, с. 19-31.

**Порфирьев Б. Н., 2016:** Экономика природных катастроф // Вестник Российской академии наук. – Т. 86, № 1. – С. 3-17.

**Порфирьев Б. Н., 2008:** Экономика климатических изменений. – М.: Анкил. – 168 с.

**Порфирьев Б. Н., Широв А. А., Колпаков А. Ю., 2020:** Стратегия низкоуглеродного развития: перспективы для экономики России // Мировая экономика и международные отношения. – Т. 64, № 9. – С. 15-25.

**Ревич Б. А., 2021:** Новые и старые риски здоровью в меняющемся климате // Проблемы анализа риска. – Т. 18, № 2. – С. 8-11.

**Ревич Б. А., Григорьева Е. А., 2021:** Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в начале XXI в. Часть 1. Волны жары и холода // Проблемы анализа риска. – Т. 18, № 2. – С. 12-33.

**Рязанцев С. В., Брагин А. Д., Рязанцев Н. С., 2020:** Положение трудовых мигрантов в регионах мира: вызовы пандемии COVID-19 и реакция правительств // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. – № 3. – С. 7-21.

**Рязанцев С. В., Письменная Е. Е., 2019:** Международная трудовая миграция в Россию: тренды и регулирование // Международные процессы. – Т. 17, № 4 (59). – С. 65-83. DOI: 10.17994/IT.2019.17.4.59.5.

**Сафонов Г. В., Сафонова Ю. А., 2013:** Экономический анализ влияния климатических изменений на сельское хозяйство России: национальный и региональный аспект. –Оксфорд: Оксфам. URL: https://grow.oxfam.ru/attach_files/file_public_1028.pdf

**Экономические аспекты модернизации сектора обращения отходов в России: научный доклад, 2020:** И. А. Буданов, А. Ю. Колпаков, Д. А. Ползиков и др. – М.: Издательство «Наука». – 121 с.

**De Bruin K., Dellink R., Agrawala S., 2009:** Economic aspects of adaptation to climate change: integrated assessment modelling of adaptation costs and benefits // OECD Environment Working Papers, № 6, 48 p. DOI: 10.1787/19970900.

**Duraiappah A. K. 1998:** Poverty and environmental degradation: A review and analysis of the nexus // World Development, v. 26, № 12, pp. 2169-2179. DOI: 10.1016/S0305-750X(98)00100-4.

**Felbermayr G., Gröschl J., 2014:** Naturally negative: The growth effects of natural disasters // Journal of Development Economics, v. 111, № C, pp. 92-106. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2014.07.004.

**Gosling S. N., Zaherpour J., Ibarreta D., 2018:** PESETA III: Climate change impacts on labour productivity – Publications Office of the European Union, Luxembourg, 35 p. DOI:10.2760/07911

**Graff Zivin J., Neidell M., 2014:** Temperature and the allocation of time: Implications for climate change // Journal of Labor Economics, v. 32, № 1, pp. 1-26. DOI: 10.1086/671766.

**Hallegatte S., Bangalore M., Bonzanigo L., Fay M., Kane T., Narloch U., Rozenberg J., Treguer D., Vogt-Schilb A., 2016:** Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty / Climate Change and Development – Washington, DC: World Bank. 207 p. URL: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22787.

**International Labour Organization (ILO), 2018 a:** The employment impact of climate change adaptation / Input Document for the G20 Climate Sustainability Working Group International Labour Office – Geneva, 46 p. ISBN 978-92-2-031115-8.

**International Labour Organization (ILO), 2018b:** World employment and social outlook 2018: Greening with jobs – Geneva, 189 p.

**International Labour Organization (ILO), 2019:** Working on a warmer planet: The impact of heat stress on labour productivity and decent work – Geneva, 104 p.

**IPCC, 2014:** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)] – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

**Kattsov V., Govorkova V., Meleshko V., Pavlova T., Shkolnik I., 2008:** Climate change projections for Russia and Central Asia States. North Eurasia Climate Centre. URL: http://neacc.meteoinfo.ru/research/91-change-climat21-eng.

**Kjellstrom T., Kovats R. S., Lloyd S. J., Holt T., Tol R. S., 2009:** The direct impact of climate change on regional labor productivity // Archives of Environmental & Occupational Health, v. 64, № 4, pp. 217-227. DOI: 10.1080/19338240903352776.

**McKinnon M., Buckle E., Gueye K., Toroitich I., Ionesco D., Mach E., Maiero M., 2016:** Climate change and labour: Impacts of heat in the workplace, 33 p. URL: https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/climate-and-disaster-resilience-/tackling-challenges-of-climate-change-and-workplace-heat-for-dev.html.

**Nelen D., Manshoven S., Peeters J. R., Vanegas P., D'Haese N., Vrancken K., 2014:** A multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling // Journal of Cleaner Production, v. 83, pp. 305-316. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.094.

**Nellemann C., Verma R., Hislop L., 2011:** Women at the frontline of climate change: Gender risks and hopes. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. 66 p.

**Noy I., 2014:** A non-monetary global measure of the direct impact of natural disasters. Geneva, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. URL: http://researcharchive.vuw.ac.nz/handle/10063/4193.

**Sandin G., Peters G. M., 2018:** Environmental impact of textile reuse and recycling – A review // Journal of cleaner production, v. 184, pp. 353-365. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.266.

**Stern N., 2007:** The Economics of Climate Change: The Stern Review – Cambridge: Cambridge University Press. 692 p. DOI:10.1017/CBO9780511817434.

**UBS Research, 2017:** UBS Evidence Lab electric car teardown: Disruption ahead? – Zurich, 95 p. URL: https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDlEbYPjF.

**World Energy Outlook, 2020:** International Energy Agency (IEA). URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020.

## Климатические риски для здоровья населения

В XXI веке изменение климата будет оказывать воздействие на здоровье человека с весьма высокой степенью достоверности, главным образом усугубляя уже существующие проблемы[1].

Можно выделить три направления, по которым изменение климата влияет на здоровье человека. Во-первых, непосредственные (прямые) воздействия – из-за экстремальных погодных явлений, в увеличении повторяемости которых изменение климата играет определенную роль. С ними связаны гибель людей, рост травматизма, повышение уровня смертности от обострения хронических заболеваний. Во-вторых, косвенные воздействия, обусловленные изменением окружающей среды и экосистем. Они сопровождаются повышением уровня смертности и заболеваемости в связи с изменением условий распространения инфекционных заболеваний различными представителями фауны, с увеличением числа заболеваний, передающихся через воду, с ростом количества осадков, с увеличением поверхностного стока, с деградацией многолетней мерзлоты. В-третьих, косвенные воздействия, опосредованные изменениями в социальных системах. Последствиями таких воздействий могут стать недоедание, нервные и психические расстройства, связанные как с ухудшением экономической ситуации, так и от стрессов из-за повышенной аномальности погоды и ряда других причин.

Для территории России риски прямого воздействия на здоровье зависят, прежде всего, от повторяемости таких опасных и аномальных явлений, как наводнения, лесные пожары, волны тепла. Крупные наводнения угрожают жизни людей, нарушают эпидемиологическую безопасность, являются причиной повышенного травматизма, вызывают психические заболевания. Дым от сильных лесных пожаров, связанных, как правило, с высокой температурой воздуха, для людей, страдающих бронхолегочными заболеваниями, может стать причиной летального исхода. Еще одна опасность – сочетанное воздействие аномальных температур и высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха, вызывающее негативные изменения в центральной нервной системе, сердце, почках, печени. Выраженное негативное воздействие на здоровье населения оказывают волны тепла. Продолжительная жаркая погода вызывает увеличение числа смертей и заболеваний системы кровообращения (см. гл. 2.2.3).

Влияние изменений климата на здоровье выходит далеко за пределы очевидного прямого воздействия во время стихийных бедствий. Повышение температуры приводит к расширению ареалов переносчиков инфекционных болезней человека (см. гл. 2.2.4).

Изменение климата повышает риск заболеваемости инфекциями с водно-пищевым путем заражения паразитарными, бактериальными и вирусными инфекциями.

Воздействие на здоровье человека оказывают деградация и опустынивание земель. Эти процессы могут привести к недостаточности питания, возрастанию числа болезней, передающихся через недоброкачественные воду и пищевые продукты, к дополнительной смертности, особенно от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний, вызванных увеличением количества пыли, перемещаемой с пустынных и полупустынных территорий.

Гибель близких, утрата имущества из-за прямых воздействий ведет к росту психических и нервных за-

[1] Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / (Катцов В. М., ред.) – СПб.: Росгидромет, 2017. – 105 с.

## 2.2.3 Погодные экстремумы и здоровье населения

***Б. А. Ревич***

Погодные экстремумы в определенной степени связаны с изменениями климата, и их последствия для здоровья населения становятся все более актуальной мировой проблемой. Экстремальные погодные и климатические явления – периоды аномально высоких и низких температур, тайфуны, наводнения, засухи и другие – отражают нарастающую климатическую изменчивость, приводят к повышению заболеваемости и смертности людей, негативно сказываются на психическом здоровье и благополучии населения.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает снижение воздействия климатических рисков на здоровье населения в качестве одной из основных целей глобального здравоохранения. Международная группа экспертов в аналитическом докладе о состоянии здоровья населения в условиях меняющегося климата (Watts et al., 2021) указала на возрастание воздействия высокой температуры на жителей планеты. Так, в 2018 г. в мире было зафиксировано более 220 млн случаев воздействия аномально высокой температуры воздуха, что намного больше, чем за предыдущие 20 лет (с 1986 по 2005 г.). В 2018 г. из-за сочетанного воздействия высоких температур и загрязнения атмосферного воздуха городов было потеряно 133,6 млрд рабочих часов, что на 45 млрд больше, чем в 2000 г.; производительность труда при температурном интегральном индексе WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) выше 24 °C (Watts et al., 2021) снизилась на 5%.

Выполненный на основе метеорологических и демографических данных разных стран расчет смертности населения в возрасте 65+ в аномально жаркие дни показал, что в России дополнительная смертность составила 18,6 тыс. случаев в год; в Германии – 20,2 тыс., в США – около 19,0 тыс. (Watts et al., 2021). Для заблаговременного принятия мер администрации больших городов, особенно городов-миллионников, должны иметь информацию о пороговых уровнях температуры воздуха, выше (ниже) которых смертность населения статистически достоверно возрастает.

Значительное число количественных определений температурных волн можно разделить на абсолютные и относительные. В первых из них изучаются фиксированные отклонения (например, 5 или 7 °C) от пороговой температуры воздуха. В относительных определениях волна, как некоторое экстремальное явление, относящееся к редким, т.е. крайним областям распределения температуры, рассчитывается как отклонение от порогового значения температуры, принимаемого равным $\pm 2\sigma$ или $\pm 3\sigma$, где $\sigma$ – стандартное отклонение распределения температур. Пороговые значения можно задавать и как процентили функции распределения температуры (1, 2,5, 3, 5% или 95, 97, 97,5, 99% – процентиль для отрицательных и положительных аномалий соответственно). Использование относительных определений, в отличие от абсолютных, позволяет сравнивать результаты для разных территорий и периодов осреднения, что особенно важно в меняющемся климате (Radinovic, Curic, 2012; Григорьева, 2017, 2019а). Температурная волна – период с экстремальными отклонениями выбранного показателя от нормы, длящийся непрерывно в течение нескольких дней. По длительности волны разделяются на короткие и длинные (Revich, Shaposhnikov, 2012; Shaposhnikov, Revich, 2016; Ревич и др., 2015в, 2018, 2019; Шартова и др., 2018).

**Периоды аномально высокой температуры как фактор риска здоровью**

По данным ВОЗ, в Европейском регионе с 2071 по 2099 г. аномально высокая температура может привести к 47-117 тыс. случаев дополнительных смертей в год (Kendrovski et al., 2017). Осуществление всеми странами мер по снижению выбросов парниковых газов, намеченных Парижским соглашением по климату, к 2030 г. оказало бы благоприятное воздействие на качество атмосферного воздуха и позволило бы сохранить в Европейском регионе жизни 74 тыс. человек (WHO, 2017). Парижским соглашением предусмотрена также необходимость повышения осведомленности о выгодах для здоровья, сопутствующих сокращению вредных выбросов. Для этого Центр по окружающей среде и здоровью Европейского Бюро ВОЗ разработал программу CaRBonH (Carbon Reduction Benefits on Health), позволяющую определять состояние здоровья и связанные с этим экономические выгоды от снижения выбросов парниковых газов. Такой документ может быть использован для оценки результатов климатической политики и содействовать принятию управленческих решений. В России в этих целях возможно использовать систему мониторинга парниковых газов, позволяющую отслеживать динамику выбросов.

Оценка частоты, интенсивности и продолжительности периодов аномально высокой температуры на основе анализа максимальных суточных температур за июнь – август с использованием 95%-го процентиля в течение 20-летнего периода (1980-1999 гг.) на территории России подробно рассмотрена в публикации В. В. Виноградовой (2020).

В 2018 г. жаркие дни, определяемые по 95%-ным экстремумам, наблюдались в различных регионах. Средняя аномалия температуры в июле 2018 г. в Средней Сибири составила 4,48 °С. Среднесуточные температуры, превышающие норму на 9 °С, были зафиксированы в междуречье Оби и Лены, где расположено большое число населенных пунктов, включая такие крупные города, как Новосибирск, Красноярск, Кемерово, Новокузнецк и другие.

В 2021 г. температура воздуха, превышающая климатическую норму, наблюдалась практически на всей территории страны, кроме Чукотки (Росгидромет, 2022).

Воздействие аномально высоких температур различной продолжительности на здоровье населения исследовано для различных регионов России. С начала XXI века число экстремально жарких дней было больше, чем в 1961-1990 гг. (Росгидромет, 2019). Так, в Москве за последние 60 лет наблюдалась устойчивая тенденция роста температуры: 0,04 °С/год за 1954-2013 гг. и 0,07 °С/год за 1976-2012 гг. (Седов, 2012). Температура воздуха, которая в июле ранее достигалась раз в 10 лет (Исаев, 2003), в наши дни становится нормой (Кислов, Константинов, 2011). Для Московского региона и окружающих областей пороговое значение средней суточной температуры, принимаемое за «норму», составляет 23,6 °С. В периоды, когда средняя суточная температура устойчиво превышает указанное пороговое значение, смертность населения Москвы возрастает более чем на 5% (Shaposhnikov et al., 2014). Данный вывод подтверждается оценкой последствий установления продолжительной аномалии высокой температуры летом 2010 г. на Европейской территории России, когда повышение смертности происходило в регионах с среднесуточной температурой на 5, а не на 7 °С выше нормы (Ревич, 2011). С 2000 по 2012 г. (за исключением 2010 г. с продолжи-

тельным периодом аномально высокой температуры, исследованным отдельно) в Москве было зафиксировано 14 периодов с аномально высокой температурой (Шапошников, Ревич, 2018). Результаты совместных с Департаментом природопользования и охраны окружающей среды Москвы исследований позволили разработать балльную шкалу опасности аномально высокой температуры и повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха, включенную в План действий органов исполнительной власти Москвы по снижению воздействия аномально высокой температуры и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения (Ревич и др., 2015а).

В Санкт-Петербурге летом 2010 г. во время прерывистого периода с аномально высокой температурой смертность от всех причин возросла по сравнению с летом 2009 г. на 30,2% (Ревич, 2011). Средняя продолжительность периодов с аномально высокой температурой в 1999-2016 гг. составляла 9 дней. Как и следовало ожидать, относительные приросты смертности в расчете на один день периода аномально высокой температуры 2010 г. оказались существенно выше, чем в расчете на один день в ансамбле периодов аномально высокой температуры за другие годы. Сравнение «ожидаемой» дополнительной смертности во время температурной аномалии 2010 г. по модельному расчету (1558 случаев) (Шапошников, Ревич, 2018) с реально наблюдаемой повышенной смертностью по данным Росстата (1533 случая) (Ревич, 2011) позволяет сделать вывод о надежности модели.

Для выявления влияния периодов аномально высокой температуры на смертность населения Арктического макрорегиона проведено двухэтапное исследование: на первом этапе выполнен анализ ежедневных показателей смертности и температуры воздуха для северных городов: Мурманска, Архангельска, Якутска и Магадана – за период 1999-2007 гг. (Shaposhnikov, Revich, 2016); на втором этапе – за 2008-2016 гг.(Ревич и др., 2018). На первом этапе работ в городах проанализировано 29 периодов аномально высокой температуры (16 коротких и 13 длительных) и получены оценки относительного риска смертности – отношения реально наблюдавшейся смертности в период аномально высокой температуры к ожидаемому ее значению для конкретных календарных дат. Короткие периоды аномально высокой температуры в северных городах оказывают более сильное влияние на уровень смертности, чем длительные. Возможное объяснение этому – «эффект жатвы»: во время длительных периодов аномально высокой температуры дополнительная смертность в конце такого периода компенсируется «эффектом жатвы» – краткосрочным смещением смертности в начало периода (Shah et al., 2020; Seltenrich, 2015; Ревич, Шапошников, 2016).

В южных городах ЕТР за 2000-2010 гг. повторяемость периодов аномально высокой температуры по сравнению с предшествующим десятилетием возросла. Достоверные положительные тренды среднегодовых и среднемесячных июльских температур выявлены по данным практически всех метеостанций городов Астрахани, Волгограда, Краснодара, Ростова-на-Дону, в которых проживает более 3,5 млн чел. Тренд средней июльской температуры за 1961-2010 гг. составил в различных городах от 0,02 °С/год ($p < 0,01$) до 0,09 °С/год ($p < 0,001$), Число экстремально жарких дней в каждом из изученных городов изменялось от 10 до 37 в год. По сравнению с 1961-1990 гг., в последующие 10 лет число экстремально жарких дней (с температурой, превышающей $\mu+2\sigma$, где

μ и σ – среднее арифметическое и стандартное отклонение среднесуточных температур июле за период 1961-1990 гг.) в Волгограде увеличилось в 3, в Краснодаре – в 1,5 раза; в Ростове-на-Дону увеличение было не столь значительным. Пороговое значение средней суточной температуры воздуха составляло в Волгограде +29,0, в Астрахани +28,6, в Краснодаре +28,2 и в Ростове-на-Дону +27,7 °С.

Для этих городов были проанализированы 22 коротких (длительностью 5-7 дней) и 19 длинных (длительностью 8 дней и более) периодов аномально высокой температуры (данные за 2010 г. рассматривались отдельно). Повышение смертности на 100 тыс. населения во время периодов аномально высокой температуры составило: 7,6 (6,7-8,5) случаев в Волгограде, 8,1 (7,2-8,9) – в Ростове, 8,5 (7,5-9,6) – в Краснодаре, и 10,8 (9,3-12,2) – в Астрахани. Наиболее высокие показатели в Астрахани объясняются рекордным числом продолжительных периодов аномально высокой температуры. В дни, когда температура превышала установленный температурный порог, наибольшее число дополнительных смертельных исходов выявлено в Волгограде и Ростове-на-Дону.

Сравнение результатов оценки дополнительной смертности в периоды аномально высокой температуры в южных и северных городах показало, что более значимый эффект наблюдается в южных городах. Так, относительный прирост смертности от цереброваскулярных заболеваний в возрасте 65+ во время периодов аномально высокой температуры составил в южных городах 66% (95%-й процентиль, доверительный интервал: 54-78%), а в северных – 35% (13-57%), т.е. относительный прирост на юге почти в два раза выше, чем на севере (Ревич и др., 2015б).

В городах с резко-континентальным климатом (Барнаул, Братск, Иркутск, Кемерово, Красноярск и Чита) за 1999-2015 гг. наиболее продолжительный период аномально высокой температуры (20 дней) имел место летом 1999 г. в Братске. Расчет рисков смертности во время периодов аномально высокой температуры в крупнейшем из шести сибирских городов – Красноярске, выполнен за 17 лет. Дополнительная смертность в периоды аномально высокой температуры за 1999-2015 гг. в возрастной группе 65+ составила 22% (95%-й процентиль, доверительный интервал: 17-28%), преимущественно вследствие заболеваний системы кровообращения (гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца) (Ревич, Шапошников, 2017).

Результаты сравнения смертности в Красноярске с аналогичными показателями в Ростове-на-Дону демонстрируют значительное различие ее уровней. В Красноярске от болезней органов дыхания умирает в два раза больше мужчин в возрасте 30-64 лет, чем в южной группе сравнения; в возрасте старше 65 лет – в шесть раз; среди женщин – в 2 и 9 раз соответственно. Можно предположить, что причиной является длительное воздействие загрязненного атмосферного воздуха. Для Красноярска с резко континентальным климатом связь между суточными перепадами температур и смертностью в возрастной группе 30-64 лет отсутствует, а в возрастной группе от 65 лет и старше она достоверно установлена для четырех из восьми причин: ишемической болезни сердца, инсультов, других болезней системы кровообращения и всех естественных причин (Ревич, Шапошников, 2017).

Для Владивостока, города с муссонным климатом, температурный порог для периодов аномально высокой температурой воздуха равен

+21,9 °С, а для эффективной температуры, учитывающей влажность и скорость ветра, он составляет +22,2 °С.

За 16-летний период (2000-2015 гг.) во Владивостоке наблюдалось 11 периодов аномально высокой температуры воздуха, со средней продолжительностью периода 10 дней, и 7 периодов аномально высокой температуры по критерию показателя эффективной температуры, со средней продолжительностью периода 9 дней. Наибольший по абсолютной величине статистически значимый риск установлен для показателя «другие болезни системы кровообращения для людей в возрасте свыше 65 лет», для которого в период превышения порогового значения эффективной температуры прирост смертности составил +37% (Ревич, 2018).

В условиях континентального муссонного климата Хабаровска волны тепла продолжительностью три дня и более со среднесуточной температурой воздуха выше 95%-го процентиля в теплое время года могут привести к увеличению смертности на 36% при отсроченном эффекте в один день (Григорьева, 2017). В целом с 1950-х гг. на юге Дальнего Востока частота периодов аномально высокой температуры по данным континентальных станций постоянно возрастает. В течение летних сезонов волновая доля – величина, показывающая долю дней с волной тепла от всех дней с экстремальными температурами за сезон, составила в среднем 35% (Grigorieva, 2020). В период с 2000 по 2017 г. самым жарким было лето 2008 г., когда наблюдалось два жарких периода в июне, четыре в июле и один в августе (Григорьева, 2019б). В июле 2011 г. длительный период аномально высокой температуры был вызван малоподвижным антициклоном на юге Дальнего Востока (Груза, Ранькова, 2012). Он длился до 25 дней и охватил огромную территорию на севере и в центральной части Хабаровского края (Григорьева, 2017; Grigorieva, 2020).

Наряду с дополнительной смертностью во время периодов аномально высокой температуры воздуха увеличивается число вызовов скорой медицинской помощи и число госпитализаций с теми или иными нарушениями здоровья. Это доказано исследованиями в Москве во время установления аномально высокой температуры в 2010 г. (Черешнев и др., 2013) и в Петрозаводске (Рыбаков, Белашев, 2020). В Симферополе частота вызовов скорой медицинской помощи в июле связана с высокими температурами и повышенной концентрацией озона в атмосферном воздухе (Евстафьева и др., 2020). Сопоставление метеорологических данных и показателей развития острой коронарной недостаточности на основе регистра больных с острым инфарктом миокарда, проведенное в Томске за 25 лет, позволило установить, что в периоды со среднесуточной температурой выше $\mu+1{,}25\sigma$, сохраняющейся в течение 5 дней подряд, заметно повышается доля госпитальной летальности (Гарганеева и др., 2017).

В докладе МГЭИК (IPCC, 2014) также указано на возможное воздействие периодов аномально высокой температуры на течение беременности: опубликованы данные о зависимости между экстремально высокими температурами и исходами беременности, включая мертворождения, вес новорожденного, неонатальный стресс (Kuehn, McCormick, 2017).

**Сочетанное воздействие периодов аномально высокой температуры и загрязнения атмосферного воздуха**

Чрезвычайные события лета 2010 г. в Москве особенно остро актуализировали проблему совместного воздействия высокой температуры

и повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами. В Москве за 40 дней блокирующего антициклона избыточная смертность достигла 11 тыс. случаев (Ревич и др., 2015в).

Сочетанное воздействие высокой температуры и повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха на смертность населения Москвы в 2007-2014 гг. описано в исследованиях кардиологов. При этом показано, что относительный риск воздействия периодов аномально высокой температуры на смертность от всех причин составляет 1,46, а от болезней системы кровообращения 1,65, т.е. смертность возрастает примерно в полтора раза (Бойцов и др., 2016). Сравнение загрязнения атмосферного воздуха в Москве и других мировых мегаполисах показывает, что для большинства крупных городов тенденции снижения загрязнения атмосферного воздуха монооксидом углерода, диоксидом серы и $PM_{10}$ аналогичны. Однако среднегодовые концентрации загрязняющих веществ во всех рассматриваемых городах характеризуются высокой пространственной изменчивостью.

**Сочетанное воздействие загрязнения атмосферного воздуха и вируса COVID-19**

Взвешенные вещества в воздухе могут образовывать кластеры с частицами коронавируса и таким способом распространяться на расстояния до 10 м от источника инфекции, способствуя заражению. Важность учета загрязнения воздуха при моделировании распространения пандемии COVID-19 вызвана схожестью механизмов влияния коронавируса и респирабельной фракции взвешенных веществ на организм человека – иммунным ответом в обоих случаях может стать цитокиновый шторм, в результате которого формируется тяжелая форма системной воспалительной реакции, приводящая к поражению органов дыхания и других систем организма человека. Согласно опубликованным модельным оценкам, в Европе не менее 6,6% смертей, а в Китае, где уровни загрязнения существенно выше, до 11% смертей от COVID-19 обусловлены загрязнением атмосферного воздуха. Загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами в эпидемиологических моделях необходимо рассматривать как один из основных факторов риска развития короновирусной инфекции. В городах России с повышенным уровнем загрязнения атмосферного воздуха, в т.ч. вошедших в Федеральный проект «Чистый воздух», загрязнение может быть одним из факторов риска развития коронавирусной инфекции (Ревич, Шапошников, 2021).

Выявленные существенные нарушения функционирования организма во время периодов аномально высокой температуры приводят к стойким и длительным нарушениям здоровья, к снижению продолжительности и качества жизни, что в итоге отражается на экономических показателях (Ревич, 2018; Otrachshenko et al., 2018, 2021).

**Периоды аномально низкой температуры как фактор риска здоровью**

При значительной межгодовой изменчивости температуры холодного периода за последние 50 лет средняя температура зимы повысилась, а повторяемость экстремально холодных дней снизилась. Оценка частоты, интенсивности и продолжительности периодов аномально низкой температуры на основе использования 5%-го процентиля распределения минимальных суточных температур за декабрь – февраль в течение 1961-2010 гг. показала, что для территории России в целом уменьшение количества волн холода проис-

ходит на фоне роста минимальных температур. В то же время в начале XXI века на юге Сибири, в южной и центральной частях ЕТР установлены области с выраженным увеличением числа длительных периодов аномально низкой температуры, их продолжительности и снижением минимальной температуры воздуха, что может говорить о нарастании климатической экстремальности (Виноградова, 2018, Титкова и др., 2018). Для Москвы и центральных областей ЕТР за период с 1976 по 2018 г. показано убывание экстремумов периодов аномально низкой температуры, выраженных 5%-ным процентилем и 10%-ным процентилем непрерывных эпизодов в течение 5 дней и более соответственно (Бардин, Платова, 2020). Длительное нахождение в условиях экстремально низких температур может привести к смерти от переохлаждения, что регулярно регистрируется в России. Неблагоприятное воздействие холода в целом и кратковременных экстремальных понижений температуры воздуха приводит к появлению и (или) обострению многих заболеваний, в первую очередь, системы кровообращения и органов дыхания; наиболее уязвимы дети и представители старшей возрастной группы. Воздействие волн холода, определяемых как 3%-й процентиль среднесуточной температуры воздуха, на смертность населения оценено в различных российских городах, и доказаны наиболее высокие риски для лиц старшего возраста. В южных городах ЕТР происходит относительный прирост смертности, равный 10% в расчете на каждый день волны, что значительно меньше, чем при периодах аномально высокой температуры (Ревич, Шапошников, 2017). В Красноярске с резко-континентальным климатом периоды аномально низкой температуры приводили к приросту смертности в день на 7,3% (95%-й процентиль, доверительный интервал: 1,1-13,8%) и 6,3% (95%-й процентиль, доверительный интервал: 1,7-11,2%) для возрастной группы 30-64 года и старшей возрастной группы, соответственно, что значительно меньше, чем при воздействии периодов аномально высокой температуры (Ревич, Шапошников, 2017).

В городах Арктического макрорегиона для идентификации периодов аномально низкой температуры также использовался ветро-холодовой индекс, позволяющий уточнить жесткое совместное действие температуры и ветра на организм человека непрерывно в течение не менее 5 дней. В Мурманске статически значимые результаты между метеорологическими показателями и показателями смертности были получены по ветро-холодовому индексу, а в Якутске – по среднесуточной температуре (Ревич и др., 2018). Скорее всего, это связано с тем, что в морском климате Мурманска жесткость погоды увеличивается при усилении ветра, а в ультраконтинентальном климате Якутска – в сурово-морозных условиях при штиле (Ревич и др., 2019). Сравнение последствий волн холода на южных и северных территориях показало, что в целом периоды аномально низкой температуры в арктических городах грозят здоровью населения гораздо бóльшими рисками, чем в южных. В то же время в северных городах, в отличие от южных регионов и средней Сибири, влияние периодов аномально низкой температуры более выражено на показателе смертности, чем периодов аномально высокой температуры (Ревич и др., 2018, 2019).

На юге Дальнего Востока самой суровой была зима 2012-2013 гг. с максимальным числом и кумулятивным эффектом выявленных волн (Grigorieva, 2020). В Хабаровске в самую хо-

лодную зиму 2010-2011 гг. было зарегистрировано четыре периода аномально низкой температуры, из которых один (в январе) длился непрерывно 12 дней (Григорьева, 2019б). Воздействие периодов аномально низкой температуры меньше, чем периодов аномально высокой температуры. Тем не менее в целом смертность как общая, так и в старшей возрастной группе, в первую очередь от сердечно-сосудистых заболеваний, намного выше в холодный период года, особенно в январе, что подтверждает факт негативного воздействия суровых холодных условий российского Дальнего Востока на терморегуляторную систему организма человека (Grigorieva, 2020). В отличие от континентальной части юга Дальнего Востока, для Владивостока с морским климатом было показано более сильное влияние периодов аномально низкой температуры, чем периодов аномально высокой температуры (Ревич, 2018). Одним из объяснений может быть установленное более высокое значение волновой доли во Владивостоке (64% для периодов аномально низкой температуры и 57% для периодов аномально высокой температуры (Ревич, 2018)) по сравнению с континентальной частью (40% для периодов аномально низкой температуры и 36% для периодов аномально высокой температуры (Grigorieva, 2020)), что говорит о более высокой экстремальности зимней погоды в морском климате.

Сопоставление эффектов разных типов температурных периодов демонстрирует большую опасность продолжительных периодов температурных аномалий для здоровья населения. Основными причинами избыточной смертности во время периодов аномально высокой и низкой температуры являются заболевания сердечно-сосудистой системы. В южных городах относительный прирост естественной смертности во время периодов аномально низкой температуры составляет 10% в расчете на каждый день, что значительно меньше, чем во время периодов аномально высокой температуры. Более выражены негативные последствия от периодов аномально высокой температуры в Астрахани и Ростове-на-Дону, а от периодов аномально низкой температуры они в большей степени проявились в Санкт-Петербурге (табл. 2.2.3.1).

Длительность периодов аномально высокой и низкой температуры в городах Арктического макрорегиона зависела от типа климата: если в Мурманске в условиях морского климата периоды аномально высокой температуры не были продолжительными (в них вошли только 25% дней с температурами выше пороговой), то в Якутске с континентальным климатом и плавным изменением температуры из-за длительных антициклонов 83% дней с эффективной температурой выше порогового значения вошли в ансамбль периодов аномально высокой температуры. Аналогичные различия проявляются и относительно периодов аномально низкой температуры. Только в Архангельске и Якутске риски избыточной смертности при воздействии периодов аномально низкой температуры выше, чем риски от периодов аномально высокой температуры. Подтвержден вывод о том, что основной вклад в повышение общей смертности вносят болезни системы кровообращения, а в среднем возрасте влияют еще и внешние причины (Ревич и др., 2018).

***Таблица 2.2.3.1***

*Относительные риски смертности в периоды аномально высокой и низкой температуры в городах, расположенных в различных климатических зонах России (Ревич, 2018)*

| Город | RRheat | | RRcold | |
|---|---|---|---|---|
| | 30–65 лет | 65+ | 30–65 лет | 65+ |
| Архангельск | 1,03 | 1,14* | 1,29* | 1,16* |
| Мурманск | 1,08 | 1,01 | 1,09 | 1,24* |
| Якутск | 1,04 | 1,03 | 1,57* | 1,26* |
| Магадан | 1,44 | 1,23 | 1,01 | 1,39* |
| Волгоград | 1,25* | 1,39* | 1,12* | 1,10* |
| Ростов–на–Дону | 1,20* | 1,39* | 1,16* | 1,12* |
| Астрахань | 1,42* | 1,58* | 1,23* | 1,14* |
| Краснодар | 1,24* | 1,37* | 1,14 | 1,17* |
| Красноярск | 1,10 | 1,14* | 1,17* | 1,04 |
| Санкт-Петербург | 1,01 | 1.09 | 1,09* | 1,07 |
| Владивосток | 1,17* | 1,09 | 1,30* | 1,11 |

*Примечания*: RRcold и RRheat – относительные риски смертности во время периодов аномально высокой и низкой температуры;

*) риск значим на 95%-м уровне.

Источники: **Санкт-Петербург**: Ревич и др. (2019); **Волгоград, Ростов-на-Дону, Астрахань**: Ревич и др. (2015б); **Красноярск**: Ревич, Шапошников (2017); **Архангельск, Мурманск, Магадан, Якутск**: Shaposhnikov, Revich (2016); Ревич и др. (2019); Владивосток: Ревич (2018)

Систематизация результатов исследований смертности во время периодов аномально высокой и низкой температуры показывает более значительный ее прирост в городах с умеренным континентальным климатом по сравнению с городами в других климатических зонах. Значение 97%-го процентиля температур может быть принято как ориентировочный показатель наступления опасного для здоровья населения периода аномально высокой температуры, по достижении которого необходимо проведение соответствующих профилактических мероприятий. Такие пороги являются определенным аналогом гигиенических нормативов и, естественно, зависят от климатической зоны. Однако если предельно допустимая концентрация или предельно допустимый уровень обозначает определенный норматив качества окружающей среды, достигаемый за счет различных технологических, природоохранных или иных мероприятий, то с климатическими рисками ситуация принципиально

иная и требует внедрения комплексных планов действий на федеральном, региональном и городском уровнях.

Риски здоровью от наводнений – утопления, переохлаждения, травмы, последние вызваны порезами, падениями, ушибами от падающих обломков или предметов, переносимых потоками воды. Загрязненная вода может вызвать инфекционные болезни, нагноение полученных при наводнениях травм, аллергические реакции, заболевания кожи. Риски для здоровья также связаны с нарушением инфраструктуры здравоохранения, в первую очередь доступностью медицинской помощи, включая медицинскую эвакуацию и обеспечение основными лекарствами. В средне- и долгосрочной перспективе могут возникнуть массовые депрессии. Наиболее уязвимы к воздействию наводнений пожилые люди, инвалиды, дети.

Угроза возникновения опасных наводнений существует в полосе умеренных широт бассейнов Волги, Дона, Оби, Тобола, Енисея (так называемый зональный среднеширотный регион), в южном регионе, на Северном Кавказе и Дальнем Востоке (Доброумов, Тумановская, 2002; Разумов и др., 2018; Добровольский и др., 2019), а также на реках в бассейне Средней Лены: Алдане, Витиме, Олекме (Разумов и др., 2018).

За последние 30 лет в Приморье и на Северном Кавказе увеличились повторяемость дождевых паводков, сопровождающаяся повышением уровня воды, а также возросла частота и мощность заторных наводнений на реках Восточной Сибири (Росгидромет, 2020).

Последствия наводнений для здоровья российского населения за последние годы представлены в табл. 2.2.3.2. Наиболее значительный ущерб здоровью населения нанесли наводнения в Иркутской обл., на Дальнем Востоке, в Краснодарском Причерноморье, в Алтайском крае.

**Тайфуны**

Тайфуны на Дальнем Востоке приводят к разрушению социальных объектов и объектов коммунального хозяйства, дорог, мостов, к затоплению угодий, повышению теплопотерь и расходов на отопление в зимний период (Аббасов, Петрашень, 2013; Василевская и др., 2020; Разжигаева и др., 2020; см. табл. 2.2.3.2).

**Ледяной дождь**

В условиях потепления климата ожидается возрастание криосферных опасностей, что требует организации их мониторинга, своевременного прогноза и предупреждения на глобальном и на региональном уровнях (Аржанова, Коршунова, 2020; Ding et al., 2021). Опасность возникновения указанных атмосферных явлений, в том числе ледяных дождей, за последние годы уменьшилась, однако показано, для них характерна высокая пространственная неоднородность (Аржанова и др., 2018; Ding et al., 2021).

Ледяной дождь в декабре 2010 г. в Московской, Смоленской, Владимирской, Тверской и Нижегородской областях привел к многочисленным обрывам линий электропередачи, оставившим без энергоснабжения более 400 тыс. чел. В медучреждениях зафиксированы сотни травм и даже человеческие жертвы; общий ущерб составил более 200 млрд руб. (Голубев и др., 2013).

**Засухи**

Последствиями засух являются недостаток или ухудшение качества питьевой воды, рост желудочно-кишечных инфекционных заболеваний, перенос пылевых масс на обширные территории, включая населенные пункты. Согласно прогнозам, в изменяющемся климате в некоторых районах мира засухи станут более интенсивными, что усугубит их негативное воздействие на здоровье населения (Dai, 2011; Национальный доклад, 2018; Золотокрылин и др., 2020; EM-DAT, 2020; Gu et al., 2020). В начале XXI века наблюдается нарастание аридизации, в первую очередь в южной части ЕТР, что может привести к усилению засух, их повторяемости, интенсивности и продолжительности и, как следствие, к дестабилизации сельскохозяйственного производства (Национальный доклад, 2018; Золотокрылин и др., 2020; Ильинская и др., 2020). Наиболее тяжелая ситуация с качеством питьевой воды существует в Калмыкии с резко континентальным засушливым климатом. В республике только 11% населения обеспечены качественной питьевой водой, причем в 2019 г. по сравнению с 2016 г. качество питьевой воды даже ухудшилось и по химическим, и по микробным показателям. Возможно, что произошедший за 2017-2019 гг. рост заболеваемости хроническим бронхитом детского населения в 3,3 раза (Государственный доклад, 2020) связан с пыльными бурями.

Погодные экстремумы, особенно наводнения и тайфуны, являются сильными стрессорными факторами, влияющими на здоровье человека. Стихийные бедствия вызывают психологические травмы, стрессы; аномально высокой температуре воздуха сопутствует психологическая дезадаптация, сопровождаемая увеличением числа суицидов, ростом уровня агрессии, загрязнение воздуха провоцирует рост когнитивных расстройств и т.д.

Большинство исследований, посвященных влиянию погодных явлений на психическое здоровье, сосредоточено на последствиях от стихийных явлений, являющихся наиболее тяжелыми с морально-психологической и социальной точек зрения. Наводнения, лесные пожары и ураганы приводят к травмам, гибели близких, утрате имущества, потере работы, нарушению привычной среды обитания – все это может вызвать острый травматический стресс, после которого возможно появление посттравматического расстройства (Berry et al., 2010; Clayton et al., 2017; Оганов, Погосова, 2007).

Определенное, чаще всего негативное, влияние на психическое здоровье оказывают и периоды аномально высокой температуры. Рядом авторов была установлена связь между высокой температурой воздуха и частотой суицидов. Сопоставление погодных карт в США (1968-2004 гг.) и Мексике (1990-2010 гг.) с данными о суицидах выявило, что при повышении среднемесячной температуры на один градус число самоубийств увеличивается, соответственно, на 0,7 и 2,1% (Burke et al., 2018). В Москве летом 2010 г. в период аномально высокой температуры число суицидов возросло в два раза в июле и в полтора раза в августе (Ревич, 2011), однако при последующем статистическом анализе достоверность этих данных не подтвердилась (Ревич и др., 2015в). Тем не менее факт нарушений психического здоровья во время жары подтверждают исследования нарушений высшей нервной деятельности, приводящих к снижению внимания, координации. Увеличение числа ДТП в жару объясняется тепловым стрессом, физиологическим дискомфортом и усталостью организма, приводящими к потере концентрации внимания.

***Таблица 2.2.3.2***

*Воздействие наводнений, тайфунов и ледяного дождя на здоровье и жизнедеятельность человека за 2010-2020 гг. (Григорьева, Ревич, 2021)*

| Опасное явление | Регион | Период | Воздействие на здоровье и жизнедеятельность человека |
|---|---|---|---|
| Наводнения | Иркутская область | Лето 2019 г. | Пострадало более 45 тыс. чел.; по разным источникам, погибло 25–26 чел., в том числе один ребенок; пропавшими без вести числились от 6 до 7 чел.; госпитализировано 496 чел. |
| | | | Обращаемость за первичной медико-санитарной помощью по поводу заболеваний кожи, органов дыхания и пищеварения; случаи инфицированных потертостей ног, ранения стоп гвоздями |
| | Дальний Восток, р. Амур | 08–09. 2013 г. | Пострадало более 360 населенных пунктов; эвакуировано из подтопленных районов более 25 тыс. чел., общее число пострадавших превысило 170 тыс. чел. |
| | | 08–09. 2019 г. | Пострадало более 360 населенных пунктов, около 70 тыс. чел.; спасено около 3 тыс. чел. |
| | Приморский край | 08–09. 2016 г. | Затоплены многие населенные пункты; возросли риски для здоровья населения из-за загрязнения питьевой воды |
| | Краснодарский край | Лето 2012 г. | Погиб 171 чел. в г. Крымске, в окрестностях Новороссийска и Геленджика; пострадало свыше 34 тыс. чел. |
| | | Осень 2018 г. | Затоплено 29 населенных пунктов; погибло 6 чел. |
| | Алтайский край | Весна 2014 г. | Подтоплено 25 муниципальных образований; пострадало около 18 тыс. чел. |
| Тайфуны | Приморский край | 08–09. 2012 г. | Два тайфуна, подтоплены улицы, дороги, социальные объекты |
| | | 08. 2016 г. | Разрушено около 70 мостов, затоплено 3 тыс. домов, пострадало 13 тыс. жителей; нарушена работа линий электропередач и связи, транспортная инфраструктура; введен режим ЧС федерального масштаба |
| | | 08. 2018 г. | Три тайфуна (Rumbia, Cimaron и Soulik): зарегистрировано превышение уровня воды на 5–7 м; объявлен режим ЧС |

| Опасное явление | Регион | Период | Воздействие на здоровье и жизнедеятельность человека |
|---|---|---|---|
| Ледяной дождь | Московская, Смоленская, Владимирская, Тверская и Нижегородская обл. | 25–26.12. 2010 г. | Многочисленные обрывы линий электропередач, в медучреждениях зафиксированы сотни травм, смертельные исходы |
| | Приморский край Владивосток | 18–19.11 2020 г. | Пострадали 39 населенных пунктов, более 200 тыс. чел. без света, воды и отопления. Открыты пункты временного размещения для населения из холодных квартир; более 660 чел. обратились в больницы с переломами и ушибами, на острове Русский около 5 тыс. чел. местных жителей остались без света и тепла |

Изменения климата наиболее выражены в Арктическом регионе, поэтому был выполнен климатический прогноз, сопряженный с оценкой дополнительной смертности населения, обусловленной экспозицией к неоптимальным температурам воздуха. Зависимость суточной смертности от среднесуточных температур воздуха получена в рамках нелинейной модели с распределенным лагом. Суточные температурные аномалии, ожидаемые к середине и концу XXI века, вычислены по ансамблевым расчетам региональной климатической модели ГГО с использованием репрезентативных траекторий концентраций парниковых газов по сценариям МГЭИК, приводящим к умеренному (RCP4.5) и максимальному (RCP8.5) потеплению. Показано, что при потеплении в российских приарктических городах можно ожидать снижения температурозависимой компоненты смертности. В городах Мурманске, Архангельске и Якутске уменьшение холодозависимой смертности компенсирует увеличение смертности во время периодов аномально высокой температуры. Смертность от всех естественных причин в возрасте от 30 лет к 2090-2099 гг. по сравнению с 1990-1999 гг. в сценарии сильного радиационного воздействия на климатическую систему RCP8.5 снизится в Мурманске на 4,5% (95%-й процентиль, доверительный интервал 1,1-7,9%), в Архангельске – на 3,1% (1,1-5,1%) и в Якутске на 3,6% (0,3-7,0%). Ожидаемое относительное снижение смертности в российской Арктике может быть в несколько раз более значительным, чем в Северной Европе, при этом доверительные интервалы полученных оценок близки по величине. Эти исследования дополняют друг друга, свидетельствуя о неравномерном распределении выгод и рисков, обусловленных глобальным потеплением (Шапошников и др., 2019; Revich et al., 2020).

**Меры адаптации к воздействию аномально высоких температур** требуют межведомственного секторального взаимодействия и заключаются со стороны метеослужбы в создании систем раннего оповещения, со стороны

здравоохранения – в комплексе мероприятий: от повышения знаний врачей о последствиях воздействия экстремально высоких температур на организм человека до дополнительного кондиционирования медицинских учреждений, создании горячих линий в поликлиниках, оптимизации работы скорой медицинской помощи, создании информационных материалов о правилах питания, питьевом режиме в этот период времени; со стороны органов социальной защиты – создание «прохладных» комнат для лиц старшего возраста, с хроническими заболеваниями и ограниченной мобильностью; организация волонтерской помощи пострадавшим от жары и другие меры. Для городов, особенно мегаполисов, чрезвычайно важно внедрение энергосберегающих технологий при строительстве и реконструкции зданий, увеличение количества и площади открытых зеленых зон в пешеходной доступности от жилых зданий, особенно в центрах городов, озеленение зданий и т.п.

**Меры адаптации к воздействию экстремально низких температур** хорошо известны и применяются постоянно и повсеместно, это – использование средств индивидуальной защиты, соблюдение, в соответствии с медицинскими рекомендациями, режима труда и отдыха работающих на открытом воздухе или в неотапливаемых помещениях, рациональное питание и другие меры.

## Список литературы


**Аббасов П. А., Петрашень А. С., 2013:** Расчет ливневых стоков во время тайфунов на примере города Владивостока и Приморского края // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – Т. 31-2, № 50. – С. 503-507.

**Аржанова Н. М., Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., 2018:** Специализированный массив данных гололедно-изморозевых явлений для мониторинга климата и климатических исследований // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Мирового центра данных. – № 182. – С. 101-110.

**Аржанова Н. М., Коршунова Н. Н., 2020:** Мониторинг характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России в холодный сезон 2017-2018 годов // Труды ГГО. – Вып. 597. – С. 90-103.

**Бардин М. Ю., Платова Т. В., 2020:** Изменения сезонных показателей экстремумов температуры воздуха в Москве и центральных областях Европейской части России // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 20-35.

**Бойцов С. А., Лукьянов М. М., Деев А. Д., Кляшторный В. Г., Иваненко А. В., Волкова Н. С., Кузнецов А. С., Скворцов А. С., Соловьев Д. В., 2016:** Влияние экологических факторов на смертность населения Москвы: возможности рисков и прогнозирования // Российский кардиологический журнал. – № 6. – С. 34-40.

**Василевская Л. Н., Лисина И. А., Василевский Д. Н., Агеева С. В., Подвербная Е. Н., 2020:** Метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур в 2019 году // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – № 2, 376. – С. 90-108. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-2-90-108

**Виноградова В. В., 2018:** Зимние волны холода на территории России со второй половины XX века // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – № 3. – С. 37-46. DOI: 10.7868/S2587556618030056

**Виноградова В. В., 2020:** Тепловое воздействие на территории России в середине XXI века по модельным данным // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – № 3. – С. 404-413. DOI: 10.31857/S2587556620030115

**Гарганеева А. А., Кужелева Е. А., Горбатенко В. П., Округин С. А., Кужевская И. В., 2017:** Особенности развития и течения острой коронарной недостаточности в период экстремально жарких погодных условий // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – Т. 16, № 5. – С. 52-56.

**Национальный доклад, 2018:** Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель: Адаптивные системы и технологии рационального природопользования: (сельское и лесное хозяйство) [Иванов А. Л., Куст Г. С., Козлов Д. Н. и др.; А. И. Бедрицкий (ред.)]. – М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, ГЕОС, 2018. – 286 с.

**Голубев А. Д., Кабак А. М., Никольская Н. А., Бутова Г. И., Хабарова Г. В., 2013:** Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25-26 декабря 2010 года // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – № 349. – С. 214-230.

**Государственный доклад, 2020:** О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Калмыкия. Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Калмыкия. – Элиста, 2021. – 140 с. https://08.rospotrebnadzor.ru/documents/10156/636dbc7b-ef89-4c0a-8145-bf174cd26188

**Григорьева Е. А., 2017:** Волны тепла на юге Дальнего Востока и здоровье человека // Информационный бюллетень «Здоровье населения и среда обитания». – № 2(287). – С. 11-14.

**Григорьева Е. А., 2019а:** Волны холода: подходы к определению и примеры для Хабаровска // Региональные проблемы. – Т. 22, № 3. – С. 24-37. DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-3-24-37

**Григорьева Е. А., 2019б:** Проявление волн жары и холода на юге Дальнего Востока в 2000-2017 гг. / Материалы Всероссийской конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (Москва 26-28 ноября 2019 г.). – М.: Физматкнига. – С. 121.

**Григорьева Е. А., Ревич Б. А., 2021:** Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в 2010-2020 гг. Часть 2. Наводнения, тайфуны, ле-

дяной дождь, засухи // Проблемы анализа риска. – Т. 18, № 3. – С. 10-31. https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-3-10-31

**Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2012:** Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ФБГУ «ВНИИГМИ – МЦД». – 194 с.

**Добровольский С. Г., Истомина М. Н., Лебедева И. П., Соломонова И. В., 2019:** Основные регионы засух и наводнений мира: природные параметры, характеристики ущербов, особенности динамики, идентификация с помощью индекса SPEI / Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. – С. 46-51.

**Доброумов Б. М., Тумановская С. М., 2002:** Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 70-78.

**Евстафьева Е. В., Лапченко В. А., Макарова А. С., Абибуллаева Н. К., Евстафьева И. А., 2020:** Температура и озон в приземном слое атмосферы как факторы риска неотложных состояний системы гемодинамики у населения южных территорий России // Экология человека. – № 5. – С. 50-56. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-5-50-56

**Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б., 2020:** Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – № 2. – С. 207-217.

**Ильинская И. Н., Безуглова О. С., Литвинов Ю. А., 2020:** Оценка аридизации территории юго-востока Ростовской области в динамике. Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации // Материалы международной научно-практической конференции. – М. – С. 152-155.

**Исаев А. А., 2003:** Экологическая климатология: монография. – М.: Научный мир. – 470 с.

**Кислов А. В., Константинов П. И., 2011:** Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 25-32.

**Оганов Р. Г., Погосова Г. В., 2007:** Стресс: что мы знаем сегодня об этом факторе риска? // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. – № 3. – С. 60-67.

**Разжигаева Н. Г., Гребенникова Т. А., Ганзей Л. А., Горбунов А. О., Пономарев В. И., Климин М. А., Арсланов Х. А., Максимов Ф. Е., Петров А. Ю., 2020:** Реконструкция палеотайфунов и повторяемости экстремальных паводков на юге острова Сахалин в среднем-позднем голоцене // Геосистемы переходных зон. – Т. 4, № 1. – С. 46-70.

**Разумов В. В., Качанов С. А., Разумова Н. В., Чириков А. Г., Шагин С. И., Беккиев М. Ю., Глушко А. Я., Пчелкин В. И., Фролко С. В., 2018:** Масштабы и опасность наводнений в регионах России. – М.: ВНИИ по проблемам ГО и ЧС МЧС России.

**Ревич Б. А., 2011:** Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека. – № 7. – С. 3-9.

**Ревич Б. А., 2018:** Климатические риски здоровью жителей мегаполисов различных климатических зон / В кн.: Человек в мегаполисе. Опыт междисциплинарного исследования; Б. А. Ревич и О. В. Кузнецова (ред.). – М.: ЛЕНАНД. – С. 340-375.

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., 2016:** Волны холода в южных городах европейской части России и преждевременная смертность населения // Проблемы прогнозирования. – № 2. – С. 125-131.

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., 2017:** Особенности воздействия волн холода и жары на смертность в городах с резко континентальным климатом // Сибирское медицинское обозрение. – № 2 (104). – С. 84-90. DOI: 10.20333/2500136-2017-2-84-90

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., 2021:** Пандемия COVID-19: новые знания о влиянии качества воздуха на распространение коронавирусной инфекции в городах // Проблемы прогнозирования. – 2021, № 4(187). – С. 28-37. DOI: 10.47711/0868-6351-187-28-37

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Авалиани С. Л., Рубинштейн К. Г., Емелина С. В., Ширяев М. В., Семутникова Е. Г., Захарова П. В., Кислова О. Ю., 2015а:** Опасность для здоровья населения Москвы высокой температуры и загрязнения атмосферного воздуха во время аномальных погодных явлений // Гигиена и санитария. – № 1. – С. 36-40.

**Ревич Б. А. Шапошников Д. А., Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2018:** Волны жары и холода в городах, расположенных в Арктической и субарктической зонах, как факторы риска повышения смертности населения на примере Архангельска, Мурманска и Якутска // Гигиена и санитария. – № 9. – С. 791-799. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2019:** Влияние температурных волн на здоровье населения в городах Северо-Западного региона России // Проблемы прогнозирования. – № 3(174). – С. 127-134.

**Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Першаген Ю., 2015в:** Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // Профилактическая медицина. – № 5. – С. 5-19.

**Ревич Б. А., Шапошников Д. В., Подольная М. А., Харькова Т. Л., Кваша Е. А., 2015б:** Волны жары в южных городах Европейской части России как фактор риска преждевременной смертности населения // Проблемы прогнозирования. – № 2. – С. 55-67.

**Росгидромет, 2019:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. – М.: Росгидромет. – 98 с.

**Росгидромет, 2020:** Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) (Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., ред.). – СПб.; Саратов: Амирит. – 120 с.

**Росгидромет, 2022:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – М.: Росгидромет. – 104 с.

**Рыбаков Д. С., Белашев Б. З., 2020:** Погодно-климатические условия, загрязнение атмосферного воздуха, вызовы скорой медицинской помощи и смертность населения в Петрозаводске // Экология человека. – № 5. – С. 21-30. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-5-21-30

**Седов В. Е., 2012:** О климатических колебаниях и тенденциях климата современной Москвы // Метеорология и гидрология. – № 8. – С. 47-58.

**Соколов Ю. И., 2018:** Риски экстремальных погодных явлений // Проблемы анализа риска. – Т. 15, № 3. – С. 6-21. https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-6-21

**Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Семенов В. А., 2018:** Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970-2015 гг. // Лед и снег. – Т. 58, № 4. – С. 486-497. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-486-497

**Черешнев В. А., Гамбурцев А. Г., Сигачев А. В., 2013:** Динамика вызовов скорой помощи Москвы (2006-2011) // Пространство и время. – № 2(12). – С. 220-228.

**Шартова Н. В., Шапошников Д. А., Константинов П. И., Ревич Б. А., 2018:** Биоклиматический подход к оценке смертности населения во время аномальной жары на примере юга России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – № 6. – С. 47-55.

**Шапошников Д. А., Ревич Б. А., 2018:** О некоторых подходах к вычислению рисков температурных волн для здоровья // Анализ риска здоровью. – № 1. – С. 22-31. DOI: 10.21668/health.risk/2018.1.03

**Шапошников Д. А., Ревич Б. А., Школьник И. М., 2019:** Сценарные оценки потепления климата и смертности населения российских приарктических городов в XI веке // Анализ риска здоровью. – 2019, № 4. – С. 37-49. DOI. 10.21668/health.risk/2019.4.04

**Berry H., Bowen K., Kjellstrom T., 2010:** Climate change and mental health: A causal pathways framework, International Journal of Public Health, v. 55, pp. 123-32.

**Burke M., Gonzalez F., Baylis P., Heft-Neal S., Baysan C., Basu S., Hsiang S., 2018:** Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. Nature Climate Change, v. 8, pp. 723-729. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0222-x

**Clayton S., Manning C. M., Krygsman K., Speiser M., 2017:** Mental Health and Our Changing Climate: Impacts, Implications, and Guidance. Washington, D.C.: American Psychological Association, and ecoAmerica, 69 p.

**Dai A., 2011:** Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, No. 1, pp. 45-65.

**Ding Y., Mu C., Wu T., et al., 2021:** Increasing cryospheric hazards in a warming climate. Earth-Science Reviews, v. 213, p. 103500. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103500

**EM-DAT. Human Cost of Disasters, 2020:** An overview of the last 20 years 2000-2019. Brussels Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), UNDRR. 2020. (http://www.emdat.be/database).

**Grigorieva E. A., 2020:** Heat and cold waves in the South of the Russian Far East in 2000-2017. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, v. 606, p. 012016. https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012016

**Gu L., Chen J., Yin J., Sullivan S., Wang H., Guo S., Zhang L., Kim J.-S., 2020:** Projected increases in magnitude and socioeconomic exposure of global droughts in 1.5 and 2 °C warmer climates. Hydrology and Earth System

Sciences, v. 24, pp. 451-472. https://doi.org/10.5194/hess-24-451-2020

**IPCC, 2014: Climate Change 2014:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

**Kendrovski V., Baccini M., Martinez G. S., Wolf T., Paunovic E., Menne B., 2017:** Quantifying projected heat mortality impacts under 21st-century warming conditions for selected European countries. International Journal of Environmental Research and Public Health, v.14, No. 7, p. E729. https://doi.org/10.3390/ijerph14070729.

**Kuehn L., McCormick S., 2017:** Heat Exposure and Maternal Health in the face of Climate Change. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 14, p. 853. doi:10.3390/ijeph14080853

**Otrachshenko V. Popova O., Solomin P., 2018:** Misfortunes Never Come Singly: Consecutive Weather Shocks and Mortality in Russia. Economics & Human Biology, v. 31, pp. 249-258. doi:10.1016/j.ehb.2018.08.008

**Otrachshenko V., Popova O., Tavares J., 2021:** Extreme temperature and extreme violence: evidence from Russia. Economic Inquiry, v. 59, pp. 243-262. https://doi.org/10.1111/ecin.12936

**Radinovic D., Curic M., 2012:** Criteria for heat and cold wave duration. Theoretical and Applied Climatology, v. 97, No. 3-4, pp. 505-510.

**Revich B. A., Shaposhnikov D. A., 2012:** Climate change, heat waves, and cold spells as risk factors for increased mortality in some regions of Russia. Studies on Russian Economic Development, v. 23, pp. 195-207.

**Revich B. A., Shaposnikov D. A., Shkolnik I. M., 2020:** Projections of temperature-dependent mortality in Russian subarctic under climate change scenarios: a longitudinal study across several climate zones. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 606, Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and management" 26-28 November 2019, Moscow, Russian Federation, 012050, DOI.org/10.1088/1755-1315/606/1/012050

**Seltenrich N., 2015:** Between Extremes: Health Effects of Heat and Cold, Environ Health Perspectives. v. 123, No. 11, pp. A275-280. DOI:10.1289/ehp.123-A275

**Shah M. A. R., Renaud F. G., Anderson C. C., Wild A., Domeneghetti A., Polderman A., Votsis A., Pulvirenti B., Basu B., Thomson C., Panga D., Pouta E., Toth E., Pilla F., Sahani J., Ommer J., El Zohbi J., Munro K., Stefanopoulou M., Loupis M., Pangas N., Kumar P., Debele S., Preuschmann S., Zixuan W., 2020:** A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 50, p.101728. DOI:10.1016/j.ijdrr.2020.101728

**Shaposhnikov D., Revich B., 2016:** Toward meta-analysis of impacts of heat and cold waves on mortality in Russian North. Urban Climate, v.15, pp. 16-24. http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.11.007

**Shaposhnikov D., Revich B., Bellander T., Bedada G. B., Bottai M., Lind T., Pershagen G., Kharkova T., Kvasha E., Leizina E., Semutnikova E., 2014:** Mortality related to interactions between heat wave and wildfire air pollution during the summer of 2010 in Moscow. Epidemiology, v. 25, pp. 359-364. DOI:10.1097/ede.0000000000000090

**Watts N., Amann M., Arnell N., Ayeb-Karlsson S., Beagley J., Belesova K., Boykoff M., Byass P., Cai W., Campbell-Lendrum D., Capstick S., Chambers J., Coleman S., Dalin C., Daly M., Dasandi N., Dasgupta S., Davies M., Di Napoli C., Dominguez-Salas P., Drummond P., Dubrow R., Ebi C. L., Eckelman M., Ekins P., Escobar L. E., Georgeson L., Golder S., Grace D., Graham H., Haggar P., Hamilton I., Hartinger S., Hess J., Hsu S.-C., Hughes N., Mikhaylov S. J., Jimenez M. P., Kelman I., Kennard H., Kiesewetter G., Kinney P. L., Kjellstrom T., Kniveton D., Lampard P., Lemke B., Liu Y., Liu Z., Lott M., Lowe R., Martinez-Urtaza J., Maslin M., McAllister L., McGushin A., McMichael C., Milner J., Moradi-Lakeh M., Morrissey K., Munzert S., Murray K. A., Neville T., Nilsson M., Sewe M. O., Oreszczyn T., Otto M., Owfi F., Pearman O., Pencheon D., Quinn R., Rabbaniha M., Robinson E., Rocklöv J., Romanello M., Semenza I. C., Sherman J., Shi L., Springmann M., Tabatabaei M., Taylor J., Triñanes J., Shumake-Guillemot J., Vu B., Wilkinson P., Winning M., Gong P., Montgomery H., Costello A., 2021:** The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. Lancet, v. 397 (10269), pp. 129-170. DOI:10.1016/s0140-6736(20)32290-x

**WHO, 2017:** Protecting Health Europe From Climate Change: 2017 update. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen. 76 pp. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/355792/.

## 2.2.4 Эпидемическая обстановка

***В. В. Ясюкевич*, А. Е. Платонов, С. В. Крыленко, А. Ю. Богданович**

Как показано во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), инфекционные болезни человека, в том числе и трансмиссивные, распространены практически повсеместно. Известно несколько сотен таких болезней, большинство из которых является климатозависимыми. Потепление климата приводит к изменению условий распространения инфекционных заболеваний.

Для трансмиссивных заболеваний меняются условия существования популяций их переносчиков, в том числе позвоночных животных, и условия развития возбудителей в переносчике, которые в случае природно-очаговых заболеваний являются прокормителями переносчиков и резервуарами инфекции. Для большинства членистоногих переносчиков болезней человека ожидается расширение периода активности, то есть более ранний выход из зимовки весной и более поздний уход в диапаузу осенью. Изменения климата влияют также на существование животных, являющихся резервуарами инфекций нетрансмиссивных природно-очаговых заболеваний.

В настоящем докладе рассматриваются лишь некоторые, характерные для нашей страны и довольно распространенные заболевания: из трансмиссивных болезней – клещевой энцефалит, иксодовые клещевые боррелиозы, сибирский клещевой риккетсиоз, крымская геморрагическая лихорадка, лихорадка Западного Нила, из факультативно-трансмиссивных – сибирская язва, чума и туляремия, а из инфекционных нетрансмиссивных – геморрагическая лихорадка с почечным синдромом и лептоспироз. Все эти заболевания являются природно-очаговыми. В качестве антропоноза рассмотрена малярия.

Гельминтозы, которые в большинстве случаев являются климатозависимыми (Паразитарные болезни человека, 2008), в данном разделе не рассматриваются.

### Клещевой энцефалит

Клещевой энцефалит – одно из распространенных природно-очаговых заболеваний на территории России. Оно известно для территории страны с 1937-1939 гг., тогда же была выяснена его вирусная этиология и роль иксодовых клещей как переносчиков и резервуаров вируса в природных очагах (Зильбер, 1939). Основной путь заражения – трансмиссивный, иногда – алиментарный (последний является результатом употребления зараженного козьего молока). Прокормителями клещей на разных стадиях развития являются животные (мелкие грызуны, насекомоядные, зайцы, копытные, птицы – обитатели нижнего яруса леса). Они же являются и резервуарами возбудителя. Вирус успешно переживает в клещах зимний период, передается трансфазово и трансовариально (Тарасов, 2002; Злобин, 2010).

Статистика многолетней динамики заболеваемости клещевым энцефалитом на территории Российской Федерации с 1992 по 2019 г. свидетельствует о том, что с 2000 г. по настоящее время наблюдается ее устойчивое снижение (рис. 2.2.4.1)[1].

[1] Здесь и далее под показателем заболеваемости понимается число больных в год в пересчете на 100 тыс. населения.

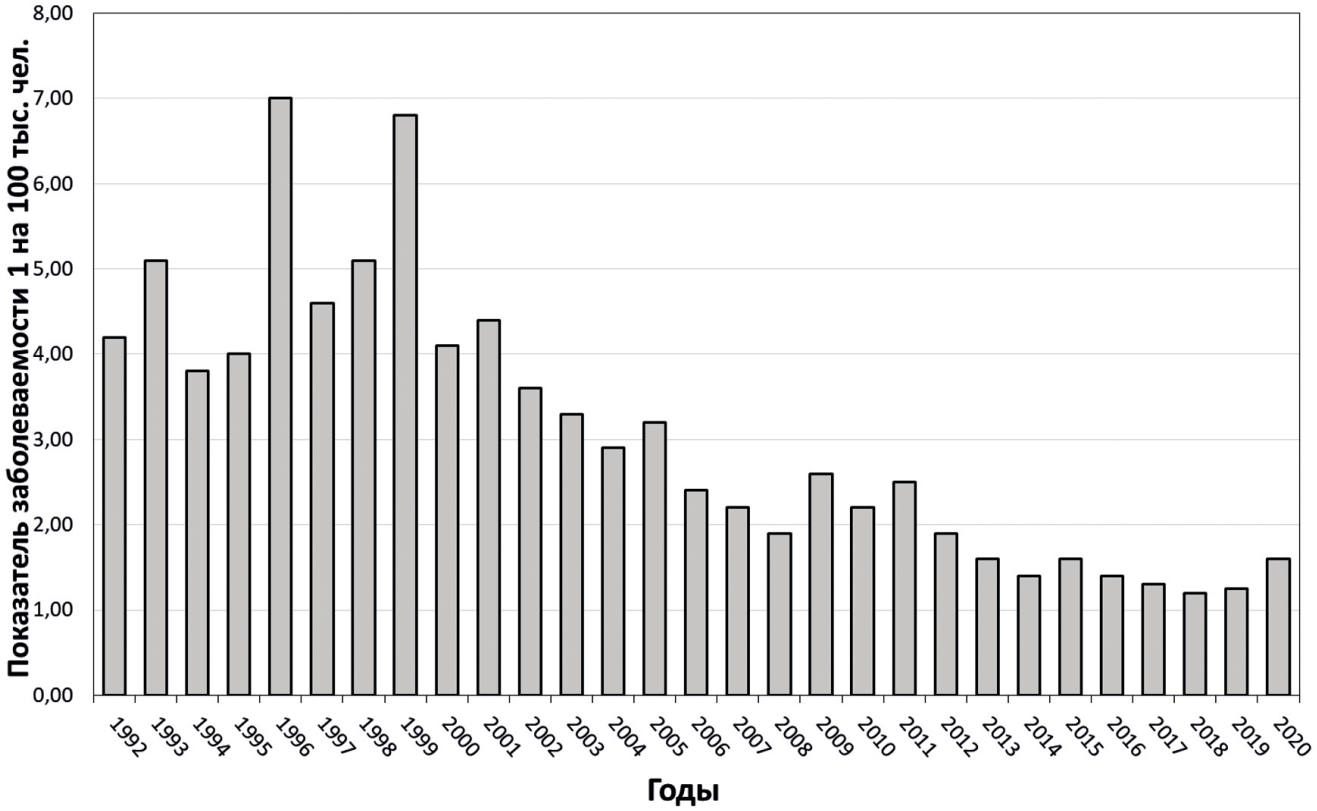



***Рис. 2.2.4.1*** *Динамика заболеваемости клещевым энцефалитом в Российской Федерации по данным: (Злобин, 2010; О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021)*

Наиболее существенное и стабильное превышение среднего по Российской Федерации уровня заболеваемости клещевым энцефалитом (в 5-10 раз) зарегистрировано, в первую очередь, в Томской области, Красноярском крае, Республиках Алтай, Тува, Хакасия, а также в Республиках Удмуртия и Бурятия, Тюменской области (Ясюкевич и др., 2016а).

Перспективы изменения заболеваемости клещевым энцефалитом можно оценить с помощью модельной оценки изменения климатических ареалов основных переносчиков – клещей *Ixodes persulcatus* и *I. ricinus* (Ясюкевич и др., 2018, рис. 2.2.4.2). По модельным оценкам ожидается расширение ареала *I. persulcatus* в северном направлении, а ареала *I. ricinus* – на северо-восток.

Согласно фактическим данным, с расширением ареала иксодовых клещей к северу в Республике Коми и Архангельской области там стали регистрироваться случаи клещевого энцефалита, которых ранее не было. Та же картина отмечается на севере Финляндии и Швеции (Попов, 2016).

При этом 63,9% от всех зарегистрированных случаев пришлось на 10 субъектов Российской Федерации – Красноярский и Пермский края, Кировскую, Кемеровскую, Новосибирскую, Свердловскую, Тюменскую, Иркутскую, Вологодскую, Челябинскую области[1].

[1] https://yandex.ru/health/turbo/articles?id=7483

а) б)

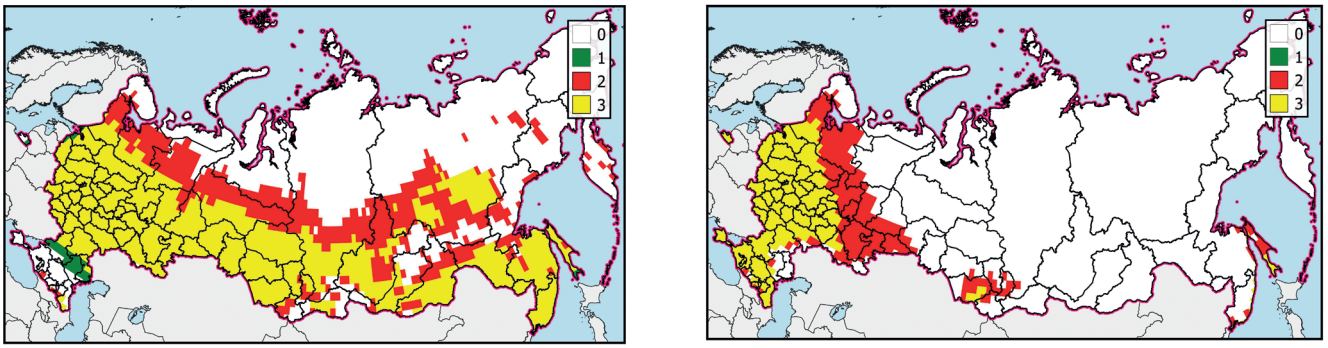



***Рис. 2.2.4.2*** *Изменение модельного климатического ареала клещей Ixodes persulcatus и Ixodes ricinus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли RCP4.5 для периода 2034-2053 гг. в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг.:*
*а) Ixodes persulcatus, б) Ixodes ricinus (по Ясюкевич и др., 2018)*
*Обозначения: 0 – переносчик отсутствует; 1 – сокращение ареала; 2 – расширение ареала; 3 – переносчик присутствовал в оба сравниваемых периода*

В 2019 г. по заболеваемости лидировали Красноярский край (показатель заболеваемости 10,85), Кировская область (8,92), Республика Тыва (6,81), Республика Алтай (5,95), Костромская область (5,93), Томская область (5,84), Новосибирская область (4,59), Республика Хакасия (4,28) при среднем уровне по Российской Федерации 1,21 (О состоянии, 2020).

**Иксодовые клещевые боррелиозы**

Патогенные спирохеты рода *Borrelia* на микробиологических, генетических и экологических основаниях делятся на несколько больших групп и вызывают инфекционные заболевания, в некоторых аспектах сходные по эпидемическим и клиническим характеристикам (Платонов и др., 2010, 2017). В Северном полушарии в зонах умеренного климата наиболее известна болезнь Лайма, которая впервые была описана в 1975 году в США (штат Коннектикут, город Лайм).

Переносчиками и резервуарами боррелий в природных очагах являются иксодовые клещи. Важнейшие на территории России – *Ixodes persulcatus* и *Ixodes ricinus* (см. рис. 2.2.4.2). Возбудитель сохраняется в них всю жизнь и передается трансфазово. Прокормителями клещей, а также и резервуарами боррелий, являются мелкие грызуны, насекомоядные, копытные, зайцы, птицы – обитатели нижнего яруса леса.

Общий комплекс переносчиков и их прокормителей обуславливает большое эпидемиологическое сходство иксодовых клещевых боррелиозов с клещевым энцефалитом. Однако нозоареал патогенных боррелий шире, чем у вируса клещевого энцефалита. Так, например, в Центральном федеральном округе во Владимирской, Калужской, Рязанской, Воронежской и Орловской областях заболеваемость боррелиозами высокая, а случаи клещевого энцефалита не выявлены (Злобин, 2010).

В Российской Федерации иксодовые клещевые боррелиозы официально регистрируются с начала 1992 г. в единой графе, без различения вида боррелий, вызвавших заболевание.

Согласно статистике многолетней динамики заболеваемости иксодовыми клещевыми боррелиозами, на территории Российской Федерации с 1994 по 2019 г. за последние 20 лет тенденции к изменению заболеваемости нет (рис. 2.2.4.3).

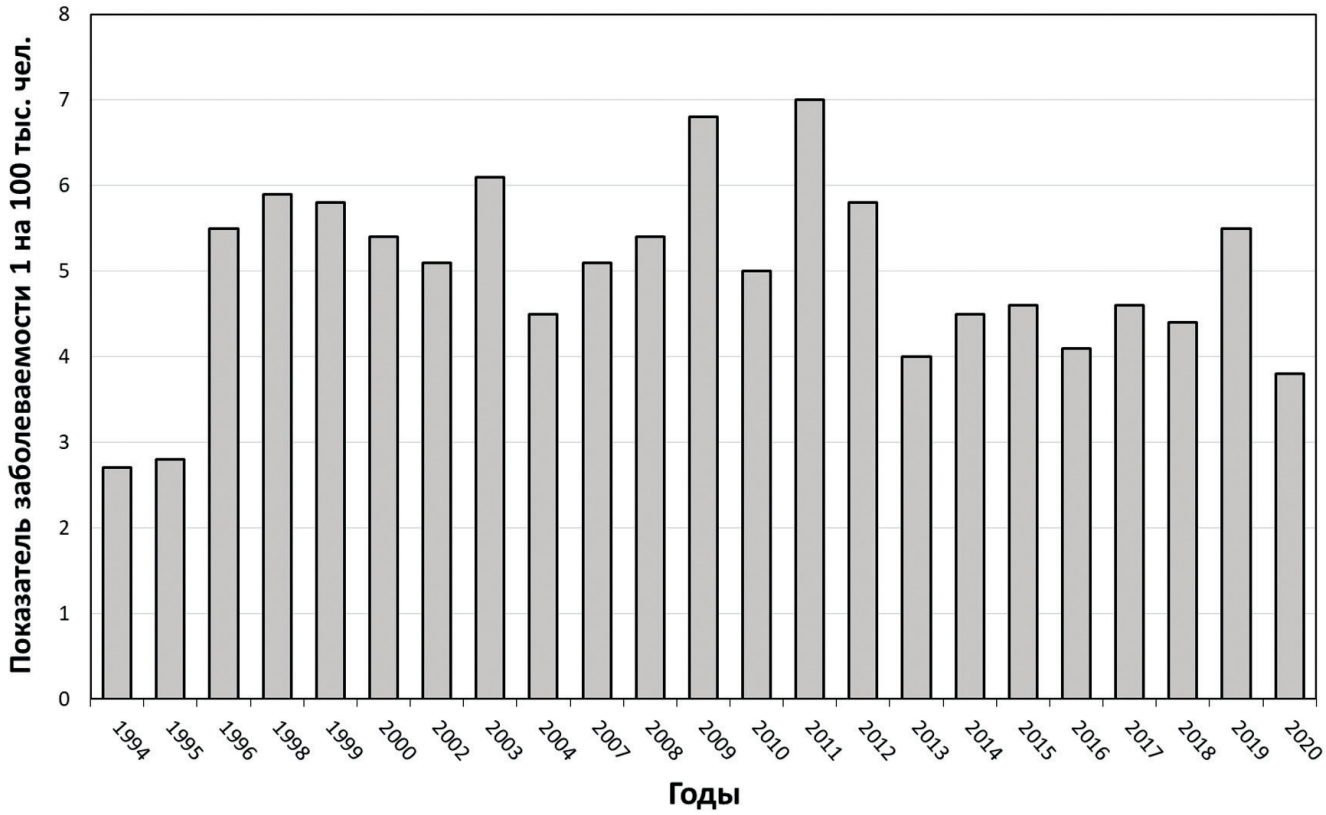



***Рис. 2.2.4.3*** *Динамика заболеваемости иксодовыми клещевыми боррелиозами в Российской Федерации (Составлено по данным: (Арумова, Воронцова, 2000; Злобин, 2010; О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021))*

В России по боррелиозам наиболее неблагоприятна эпидемическая обстановка на территории Кировской, Вологодской, Томской, Костромской областей, Республики Тыва, Ярославской и Свердловской областей, Республики Удмуртия и Пермского края, что свидетельствует о повышенном риске заболеваемости населения этих субъектов Российской Федерации в отношении иксодовых клещевых боррелиозов (Ясюкевич и др., 2016а).

**Сибирский клещевой риккетсиоз**

Сибирский клещевой риккетсиоз – природно-очаговое, облигатно-трансмиссивное заболевание, возбудителем которого является *Rickettsia sibirica* из группы возбудителей клещевых возвратных лихорадок. Резервуаром инфекции являются мышевидные грызуны, суслики, зайцы. Нозоареал заболевания охватывает пространство от Урала до побережья Тихого океана. Наиболее распространено заболевание в Сибирском федеральном округе.

Очень высокий уровень заболеваемости зарегистрирован в Республике Алтай, высокий – в Алтайском крае и Республике Хакасия, выше среднего – в Республике Тыва. На территории остальных субъектов Российской Федерации

уровень заболеваемости – средний или низкий (Штрек и др., 2019).

**Крымская геморрагическая лихорадка**

Крымская геморрагическая лихорадка (КГЛ) периодически регистрируется в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах Российской Федерации, а в пределах бывшего СССР – в Средней Азии, Закавказье, в Украине.

Особенностями многолетней динамики заболеваемости КГЛ являются пики 2006-2008 гг. и последующее снижение заболеваемости (рис. 2.2.4.4).

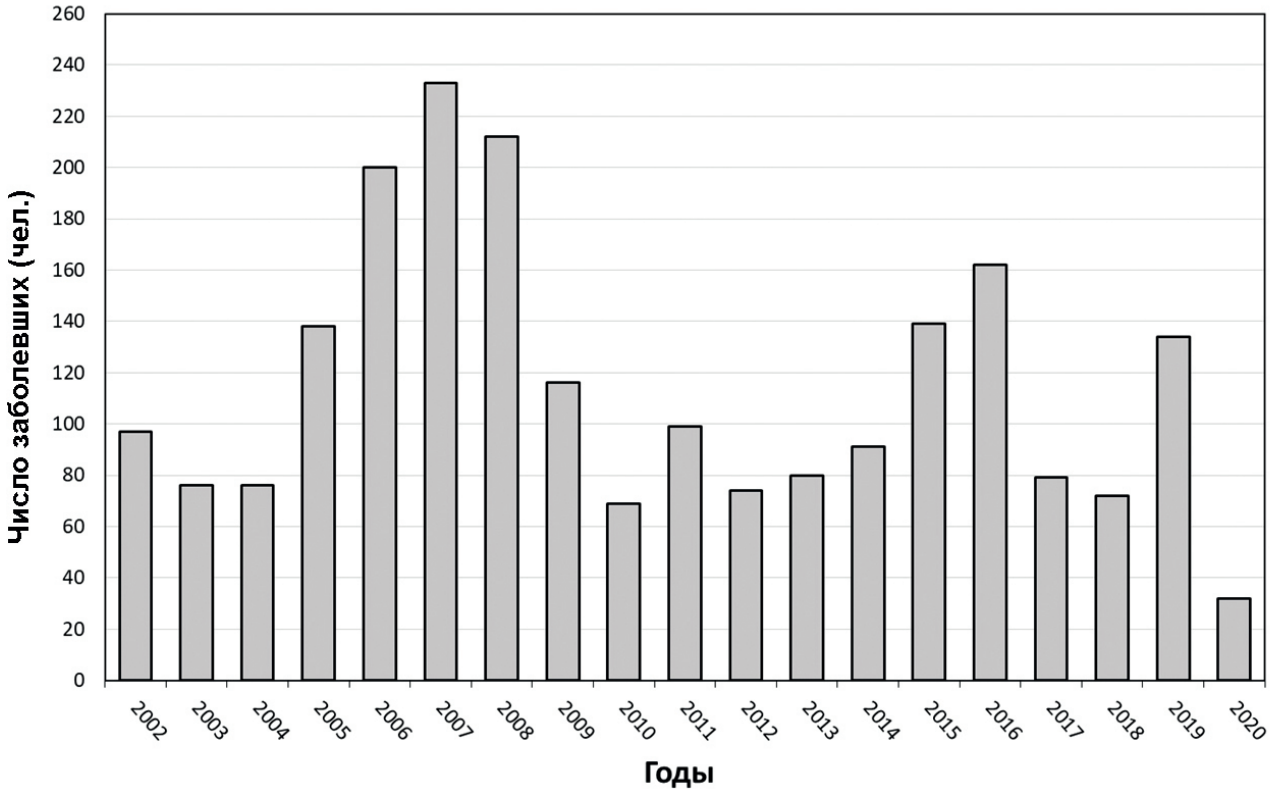



***Рис. 2.2.4.4*** *Заболеваемость крымской геморрагической лихорадкой в Российской Федерации (Составлено по данным: (Злобин, 2010; О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021))*

В России наиболее высокая заболеваемость КГЛ – в Ставропольском крае, Республике Калмыкия, Астраханской и Ростовской областях (Василенко и др., 2021). В период с 2000 по 2019 г. произошло существенное расширение ареала КГЛ вплоть до северных границ Волгоградской области (Куличенко, Прислегина, 2019).

Моделирование климатического ареала КГЛ (Ясюкевич, Попов, 2020) выявило тенденцию к дальнейшему расширению нозоареала в будущем (рис. 2.2.4.5).

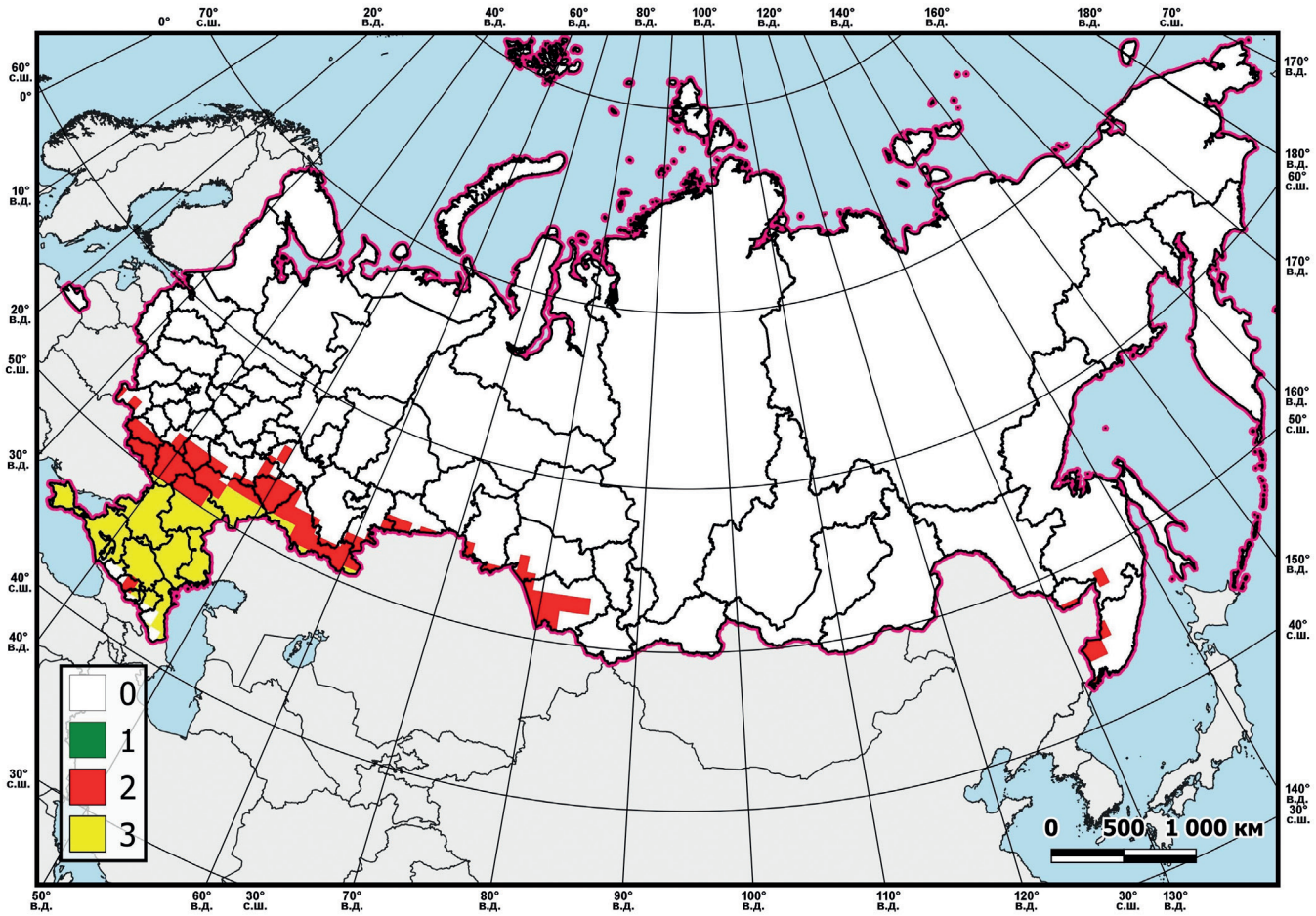



***Рис. 2.2.4.5*** *Предполагаемые изменения климатического нозоареала КГЛ в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли RCP4.5 для периода 2034-2053 гг., в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг. (по Ясюкевич, Попов (2020))*

*Обозначения: 0 – циркуляция вируса отсутствует; 1 – сокращение нозоареала (в данном случае не выявлено); 2 – потенциальное расширение нозоареала; 3 – циркуляция вируса возможна в период 2034-2053 гг.*

**Лихорадка Западного Нила**

Лихорадка Западного Нила (ЛЗН) – природно-очаговое заболевание, циркулирующее в популяциях птиц, в основном водного и околоводного комплексов. В Российской Федерации ЛЗН регистрируется с 1997 года. Динамика заболеваемости представлена на рис. 2.2.4.6.

Крупные вспышки ЛЗН, во время которых сотни больных были госпитализированы с тяжелыми формами нейроинвазивной или лихорадочной инфекции, на территории Российской Федерации регистрировались в 1999, 2010, 2012 и 2019 гг., заметный подъем заболеваемости имел место в 2005, 2007 и 2016 гг. (Малецкая и др., 2020). Наиболее неблагоприятна обстановка в Волгоградской, Астраханской, Ростовской, Воронежской и Саратовской областях, на долю которых приходится около 85% от всех случаев ЛЗН в Российской Федерации.

Моделирование климатического ареала ЛЗН (Ясюкевич и др., 2019) выявило тенденцию к расширению нозоареала для середины XXI века (рис. 2.2.4.7).

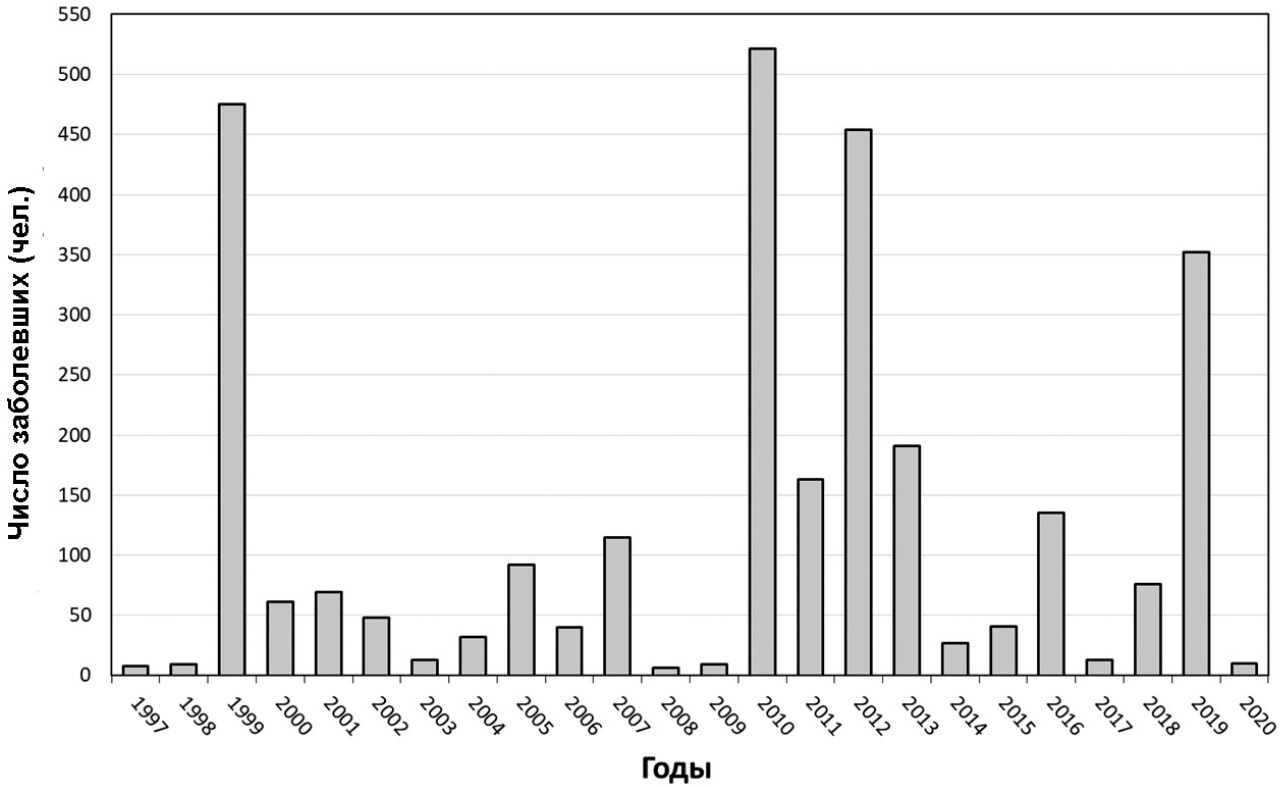



***Рис. 2.2.4.6*** *Динамика заболеваемости лихорадкой Западного Нила в Российской Федерации (Составлено по данным: (О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021))*

а) б)

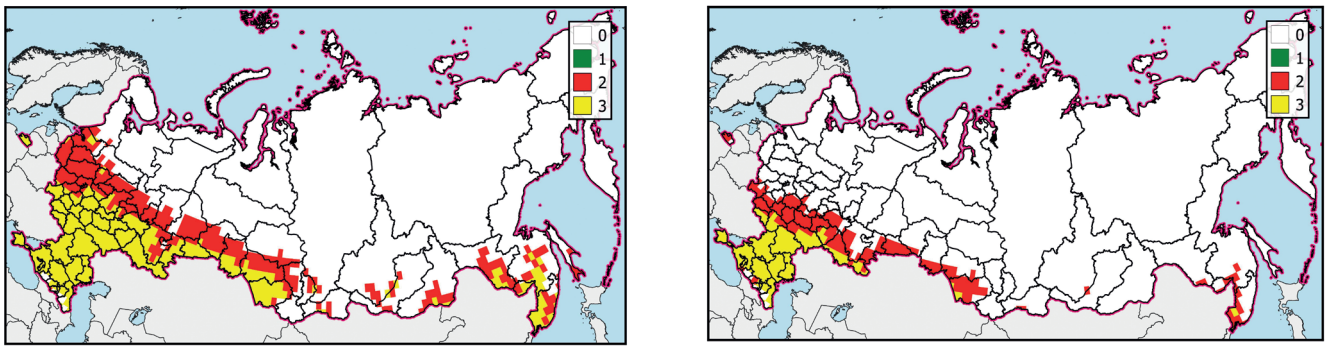



***Рис. 2.2.4.7*** *Предполагаемые изменения климатического нозоареала ЛЗН в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли RCP4.5 для периода 2034-2053 гг., в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг.: а) возможность эпидемических вспышек в теплое время года (нереализованная в желтых областях в 1981-2000 гг.); б) возможность возникновения эндемических очагов (по Ясюкевич и др. (2019))*

*Обозначения: 0 – циркуляция вируса отсутствует; 1 – сокращение нозоареала (в данном случае не выявлено); 2 – расширение нозоареала; 3 – циркуляция вируса возможна в оба сравниваемых периода*

**Малярия**

Малярия является одним из самых распространенных заболеваний на Земле. К началу 1960-х гг. малярия как эпидемическое заболевание на территории СССР была ликвидирована (Ясюкевич, 2002; Кондрашин и др., 2011). В настоящее время эпидемическая ситуация по малярии в Российской Федерации не внушает опасений. В последнее время ежегодно регистрируется около сотни завозных случаев малярии, вторичных от завозных случаев заражения практически нет (рис. 2.2.4.8). Однако предпосылки появления малярии на территории России сохраняются. К ним можно отнести продолжающийся завоз, обилие видов и высокая численность переносчиков, благоприятные климатические условия для развития переносчиков и прохождения части цикла развития возбудителя малярии в их организме.

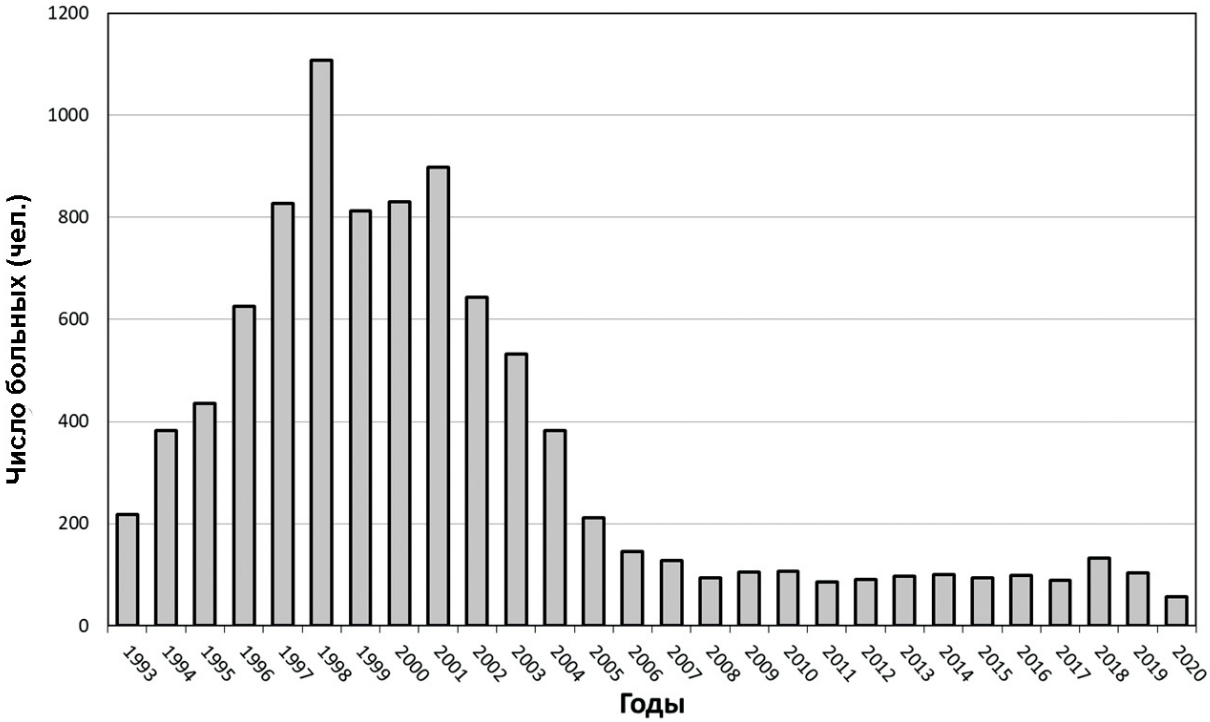



***Рис. 2.2.4.8*** *Динамика заболеваемости малярией в Российской Федерации (Составлено по данным: О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021)*

**Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом**

Динамика заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом (ГЛПС) представлена на рис. 2.2.4.9.

За 1992-2019 гг. пиковое значение заболеваемости пришлось на 1997 г. Явный тренд в динамике заболеваемости отсутствует, но она претерпевает циклические колебания.

Наиболее неблагополучная обстановка сохраняется в ряде субъектов Приволжского федерального округа – прежде всего в Республиках Удмуртия, Башкортостан, Марий Эл и Мордовия, а в несколько меньшей степени – в Пензенской области, Республике Татарстан, Оренбургской и Ульяновской областях. Это свидетельствует о повышенной уязвимости населения этих республик к ГЛПС.

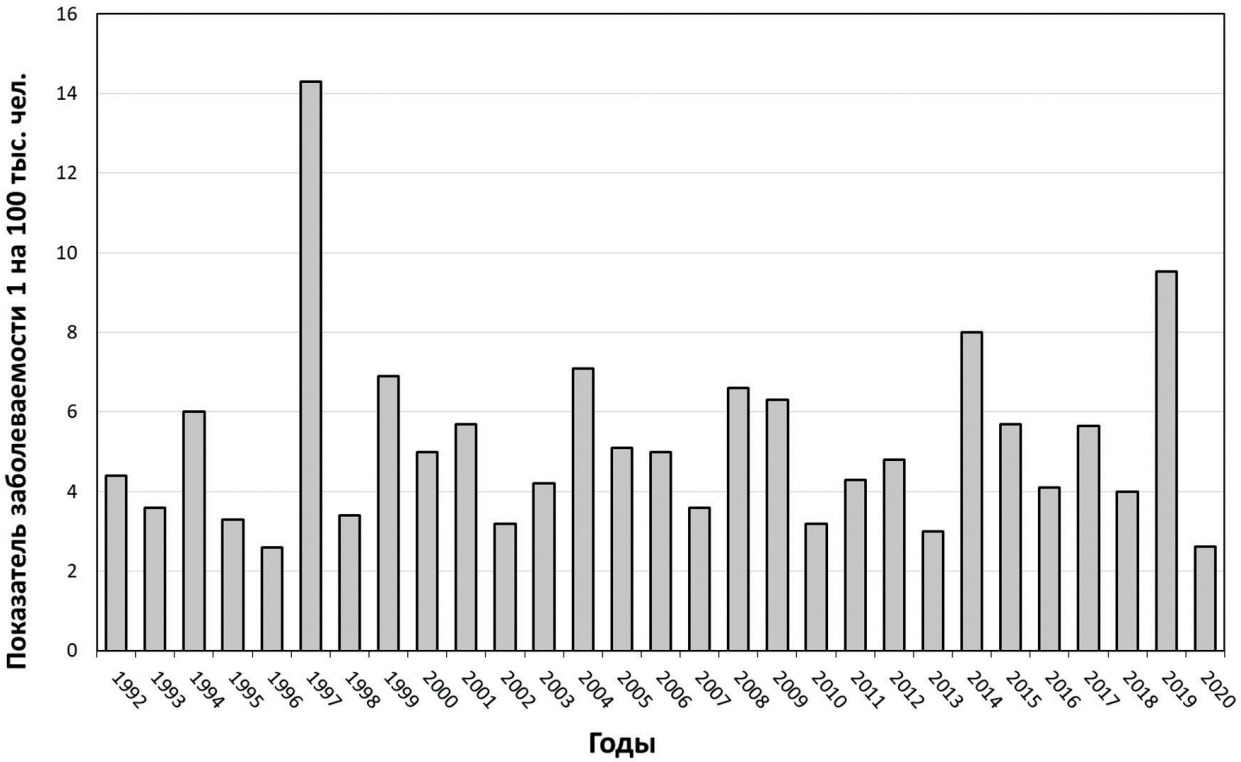



***Рис. 2.2.4.9*** *Динамика заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом в Российской Федерации (Составлено по данным: О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021)*

**Туляремия и лептоспироз**

Эпидемиология таких бактериальных инфекций, как туляремия и лептоспироз, допускает зависимость заболеваемости от изменения климата.

Туляремия – природно-очаговый зооноз, возбудителем которого является бактерия *Francisella tularensis*. Это заболевание широко распространено на территории России.

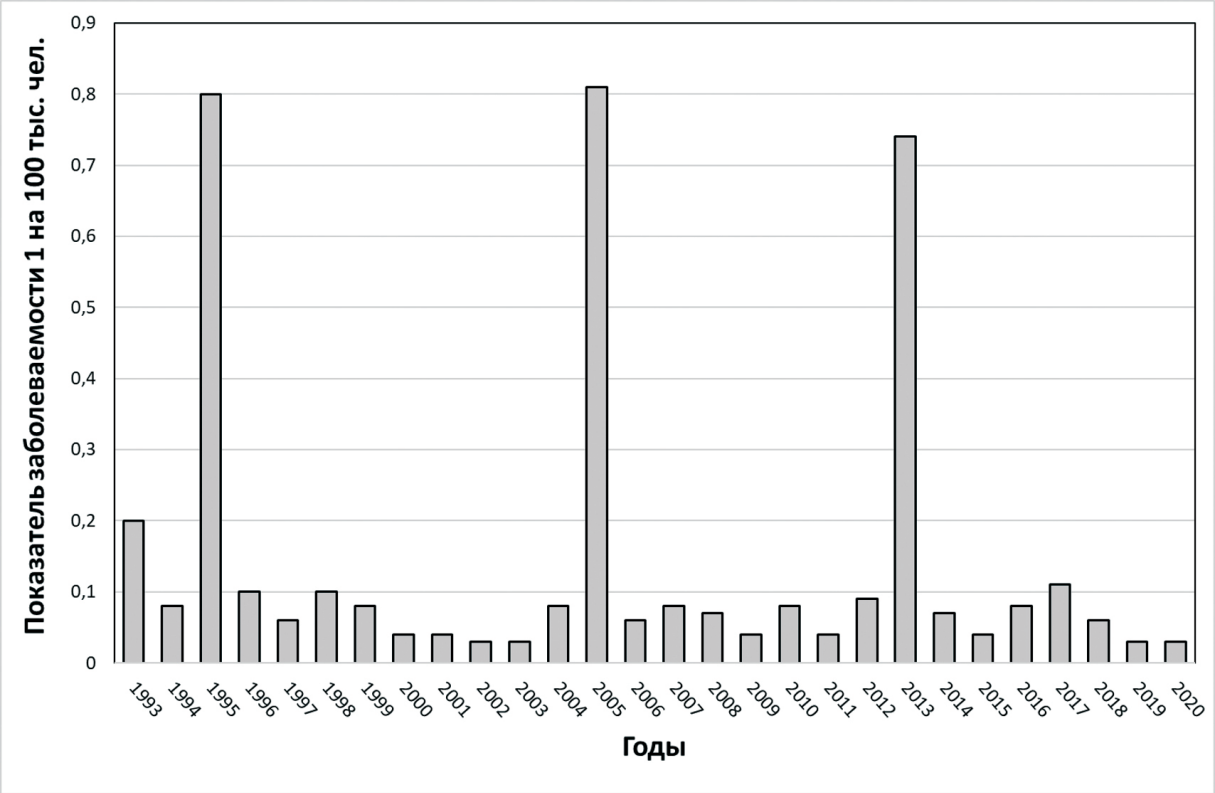
Лептоспироз широко распространен на территории России. Возбудителем является ряд сходных между собой спирохет рода *Leptospira*. Пути заражения различны: аспирационный, контактный, алиментарный. Выделяют два типа очагов заболевания: природные и антропургические.

Заболеваемость лептоспирозом существенно выше, чем туляремией (рис. 2.2.4.10б). В региональном аспекте особенно неблагоприятна эпидемическая обстановка в Республике Мордовия. Неблагоприятна также обстановка в Краснодарском крае и Смоленской области (Ясюкевич и др., 2016а).

Обращает на себя внимание тот факт, что для большинства рассматриваемых заболеваний, несмотря на изменение климата, показатели заболеваемости в среднем по Российской Федерации более или менее постоянны или снижаются. Это можно объяснить успехами современной медицины, повышением информированности населения, во многом благодаря общедоступности сети Интернет. Однако в ряде субъектов Российской Федерации заболеваемость выше средней в 5-10, а то и более раз. В других субъектах она может быть существенно ниже, или вовсе отсутствовать. Таким образом, средние показатели нивелиру-

ются (Ясюкевич др., 2016а). Не исключена также принципиальная возможность того, что фиксируемое Роспотребнадзором снижение заболеваемости отчасти связано с ухудшением диагностики и снижением числа диагностических исследований.

а)




б)

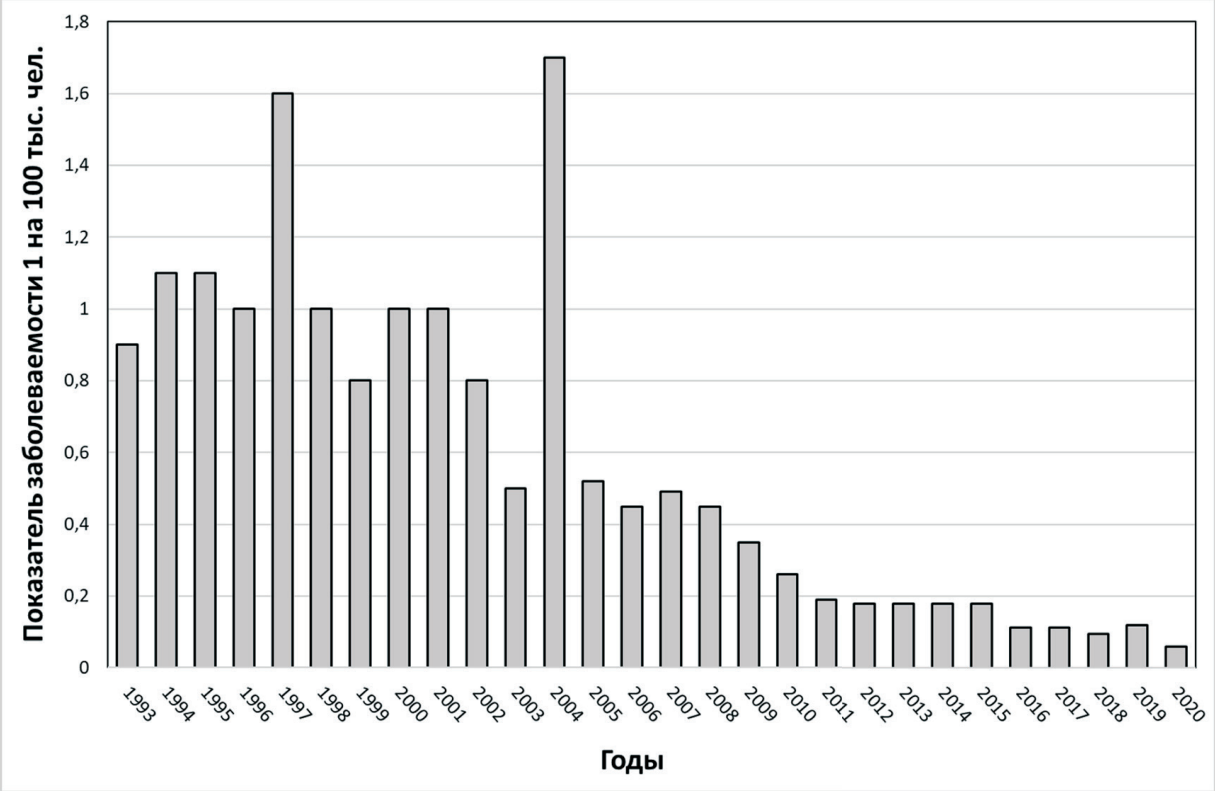



***Рис. 2.2.4.10*** *Динамика заболеваемости туляремией (а) и лептоспирозом (б) в Российской Федерации (Составлено по данным: О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021)*

**Сибирская язва**

Сибирская язва (anthrax, pustula maligna) – острое природно-очаговое заболевание, относящееся к группе особо опасных. Встречается на всех континентах. Возбудителем ее является бактерия *Bacillus anthracis*. Вегетативные формы весьма нестойки к воздействию внешней среды и дезинфицирующих средств. Споры же, напротив, очень устойчивы ко всем неблагоприятным воздействиям и в почве сохраняют жизнеспособность в течение многих десятилетий.

На территории России заболеваемость сибирской язвой регистрируется эпизодически в течение многих лет (Ясюкевич и др., 2016б). На рис. 2.2.4.11 представлена динамика заболеваемости сибирской язвой.

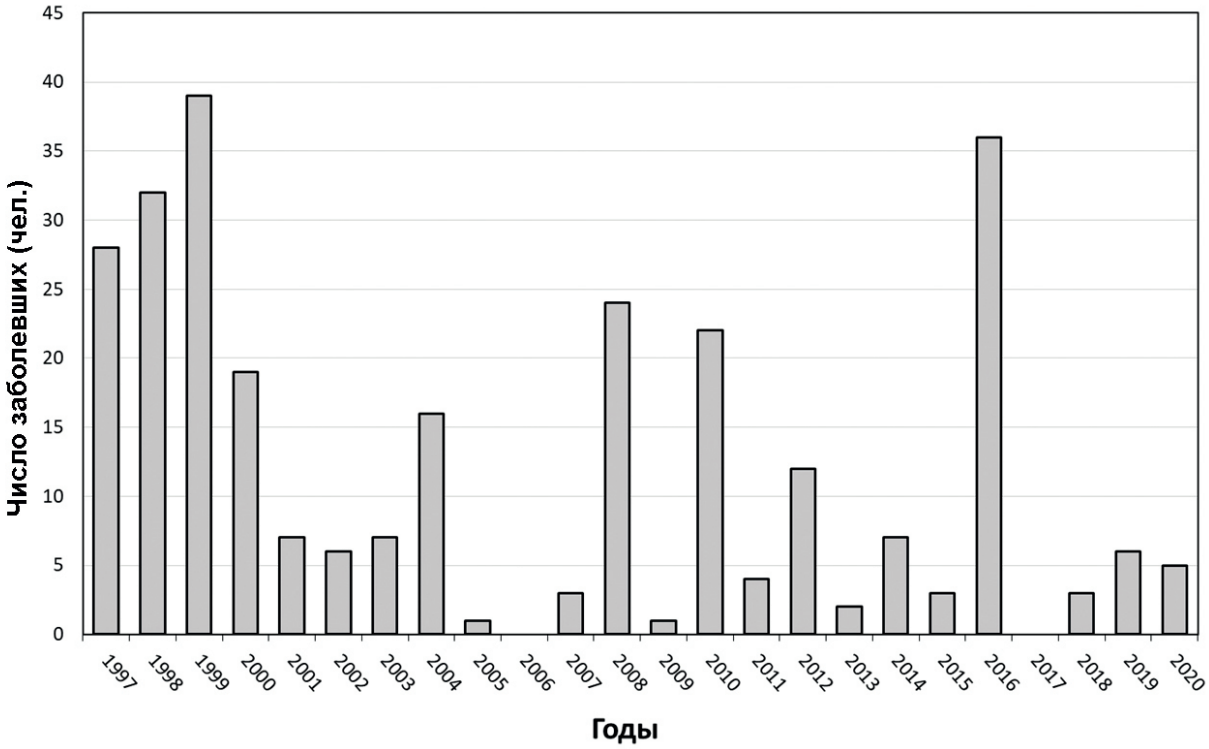



***Рис. 2.2.4.11*** *Динамика заболеваемости сибирской язвой в Российской Федерации (Составлено по данным: О санитарно-эпидемиологической обстановке, 1999; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия, 2012, 2021)*

В июле – начале августа 2016 года российская и мировая общественность были обеспокоены эпидемической вспышкой сибирской язвы на полуострове Ямал в 200 км от поселка Яр-Сале Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Вспышка возникла на фоне широкомасштабной эпизоотии среди северных оленей, причиной которой, по мнению ряда источников, следует считать аномально высокие температуры воздуха в июне и июле 2016 г. (Симонова и др., 2017), способствовавшие «вытаиванию» спор сибирской язвы из многолетнемерзлых пород. В результате пало 2572 оленей, заболело 24 человека, один из них погиб.

Не отрицая влияния изменения климата на распространение и проявление инфекционных заболеваний, тем не менее есть основания полагать, что решающей причиной эпидемической вспышки сибирской язвы погодно-климатические условия лета 2016 г. не являются. Предпосылки для возникновения эпизоотии,

а затем и эпидемической вспышки создались в результате отмены в 2007 году вакцинации северных оленей, а также населения, принадлежащего к группам риска (Ясюкевич и др., 2016б).

Несмотря на эпизодическую заболеваемость, эпидемическая обстановка по сибирской язве остается напряженной. В России насчитывается более 35 тыс. стационарно неблагополучных по сибирской язве пунктов, в которых учтено около 8 тыс. скотомогильников. Из них только 52% имеют ветеринарно-санитарные карточки, а 37% соответствуют ветеринарно-санитарным требованиям. В этом отношении наиболее неблагополучна ситуация в Уральском федеральном округе (9,7 и 7,5%), в состав которого входит Ямало-Ненецкий автономный округ (Постановление, 2014).

**Чума**

Несмотря на то что чума является особо опасным заболеванием, заболеваемость ею в России очень мала. Так, в 1977-1986 гг. выявлено девять заболевших, в 1987-1989 гг. – пять человек. За последующие годы в открытой печати сведения не приводятся.

В настоящее время под влиянием потепления климата отмечена общая тенденция значительного снижения эпизоотической и эпидемической активности природных очагов чумы. На территории России наиболее выраженное негативное влияние прослеживается в границах степных, полупустынных и пустынных ландшафтно-географических зон. Напротив, тенденция роста эпизоотической активности имеет место в горных и высокогорных природных очагах чумы России и других стран СНГ, Монголии, Китая и Киргизской Республики. В частности, в 2013-2017 гг. произошел значительный рост потенциальной эпидемической опасности Горно-Алтайского высокогорного и Тувинского горного природных очагов чумы (Попов и др., 2019).

**Пандемия COVID-19**

В конце декабря 2019 года китайские власти сообщили о вспышке пневмонии неизвестного происхождения в городе Ухань. Первые заболевшие имели отношение к рынку морепродуктов. По другой версии вирус передался человеку от летучих мышей. Эксперты предварительно установили, что возбудителем заболевания стал новый тип РНК-содержащего коронавируса – 2019-nCoV (COVID-19). Заболевание быстро распространялось по городам и провинциям Китая, затем перекинулось на большинство стран мира. Это привело к тому, что на брифинге в Женеве 11 марта 2020 г. гендиректор ВОЗ Тедрос Адханом Гебрейесус заявил, что распространение нового коронавируса в мире приобрело характер пандемии

В Российской Федерации заболевание регистрируется с середины марта 2020 г. Наибольшее число случаев заболевания зарегистрировано в Москве, что объясняется тем, что это наибольший населенный субъект Российской Федерации.

Оснований считать COVID-19 климатозависимым заболеванием пока нет. Так называемая «первая волна» отмечалась со второй половины апреля до первой половины июня 2020 г., то есть в теплое время года. «Вторая волна» зарегистрирована в октябре 2020 – феврале 2021 гг. Более определенно на этот вопрос можно будет ответить в будущем, по мере накопления статистических материалов. Весной 2022 г. вновь отмечен рост заболеваемости.

**Меры адаптации**

Меры адаптации к природно-очаговым заболеваниям сводятся к следующему. Специфическая профилактика – это вакцинация. Она наиболее эффективна, но только в том случае, если к данному заболеванию разработана вакцина. Например, в отношении боррелиозов вакцин нет.

Меры неспецифической профилактики рассматриваемых в данной главе заболеваний более разнообразны. Это – мониторинг популяций животных, являющихся резервуаром и источником инфекции в природных очагах, а в случае трансмиссивных инфекций – еще и мониторинг популяций их переносчиков и прокормителей. При необходимости проводятся мероприятия по их искоренению, например, борьба с грызунами в населенных пунктах, противоклещевые обработки в населенных пунктах и их ближайших окрестностях, осушение затопленных подвалов, служащих местом размножения комаров *Culex pipiens molestus*, которые являются основными переносчиками ЛЗН в городских условиях.

К неспецифическим мерам профилактики относятся: использование репеллентов, специальной одежды, защищающей от нападения кровососов, пологов над спальными местами. Эти меры позволяют существенно снижать угрозы здоровью населения.

Ранее высокоэффективным методом была химиотерапевтическая профилактика, применяемая против гриппа, ОРЗ, малярии, некоторых гельминтозов. В настоящее время этому направлению не уделяется достаточное внимание.

Перечисленные меры позволяют существенно снизить вероятность угрозы здоровью населения.

## Список литературы


**Арумова Е. А., Воронцова Т. В., 2000:** Клещевой боррелиоз (болезнь Лайма) в России // Дезинфекционное дело. – № 2. – С. 5-7.

**Василенко Н. Ф., Прислегина Д. А., Малецкая О. В., Таран Т. В., Платонов А. Е., Куличенко А. Н., 2021:** Заболеваемость арбовирусными инфекциями на юге европейской части Российской Федерации // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – № 1. – С. 84-90.

**Зильбер Л. А., 1939:** Весенний (весенне-летний) эпидемический клещевой энцефалит // Архив биологических наук. – Т. 56, Вып. 2. – С. 9-37.

**Злобин В. И., 2010:** Эпидемиологическая обстановка и проблемы профилактики клещевого энцефалита в Российской Федерации // Прикладная энтомология. – № 1 (1). – С. 14-21.

**Кондрашин А. В., Баранова А. М., Морозова Л. Ф., Степанова Е. В., 2011:** Тенденции в борьбе с малярией в мире. Прогресс и актуальные задачи в программах борьбы с малярией // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. – № 4. – С. 3-8.

**Куличенко А. Н., Прислегина Д. А., 2019:** Крымская геморрагическая лихорадка: климатические предпосылки изменений активности природного очага на юге Российской Федерации // Инфекция и иммунитет. – Т. 9, № 1. – С. 162-172.

**Малецкая О. В., Прислегина Д. А., Таран Т. В., Платонов А. Е., Дубянский В. М., Волынкина А. С., Василенко Н. Ф., Цапко Н. В., 2020:** Природно-очаговые вирусные лихорадки на юге европейской части России. Лихорадка Западного Нила // Проблемы особо опасных инфекций. – № 1. – С. 109-114.

**О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 1998 году:** Государственный доклад, 1999: – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 222 с.

**О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад, 2021:** – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 256 с.

**О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2011 году: Государственный доклад, 2012:** – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 316 с.

**Паразитарные болезни человека (протозоозы и гельминтозы), 2008:** Руководство для врачей. Под ред. В. П. Сергиева, Ю. В. Лобзина, С. С. Козлова. – СПб.: ООО «Изд-во Фолиант». – 592 с.

**Платонов А. Е., Малеев В. В., Карань Л. С., 2010:** Боррелиозные возвратные лихорадки: забытые и новые // Терапевтический архив. – № 11. – С. 74-80.

**Платонов А. Е., Топоркова М. Г., Колясникова Н. М., Стуколова О. А., Долгова А. С., Бродовикова А. В., Махнева Н. А., Карань Л. С., Koetsveld J., Шипулин Г. А., Малеев В. В., 2017:** Клиника иксодового клещевого боррелиоза, вызванного *Borrelia miyamotoi,* в контексте иммунного ответа на возбудителя // Терапевтический архив. – № 11. – С. 34-42.

**Попов Н. В. Карнаухов И. Г., Пакскина Н. Д., Ерошенко Г. А., Кузнецов А. А., Матросов А. Н., Поршаков А. М., Куклев Е. В., Иванова А. В., Корзун В. М., Косилко С. А., Зенкевич Е. С., Попов В. П., Лопатин А. А., Аязбае Т. З., Балахонов С. В., Кутырев В. В., 2019:** Оценка современной эпидемиологической обстановки в природных очагах чумы мира. Повышение эффективности эпидемиологического надзора в природных очагах чумы Российской Федерации и прогноз их эпизоотической активности на 2019 г. // Проблемы особо опасных инфекций. – № 1. – С. 81-88.

**Попов И. О., 2016:** Климатически обусловленные изменения аутэкологических ареалов иксодовых клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* на территории России и стран ближнего зарубежья. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева. – 112 с.

**Постановление № 81 от 10.12.2014 г.** Главного Государственного Санитарного Врача Российской Федерации А. Ю. Поповой «Об усилении мероприятий, направленных на профилактику сибирской язвы в Российской Федерации». – М. – 7 с.

**Росгидромет, 2014.** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Симонова Е. Г., Картавая С. А., Титков А. В., Локтионова М. Н., Раичич С. Р., Толпин В. А., Лупян Е. А., Платонов А. Е., 2017:** Сибирская язва на Ямале: оценка

эпизоотологических и эпидемиологических рисков // Проблемы особо опасных инфекций. – № 1. – С. 89-93.

**Тарасов В. В., 2002:** Эпидемиология трансмиссивных болезней. – М.: Изд-во МГУ. – 336 с.

**Штрек С. В., Рудаков Н. В., Пеньевская Н. А., Савельев Д. А., Блох А. И., 2019:** Многолетняя динамика и интенсивность эпидемического процесса сибирского клещевого тифа в федеральных округах и субъектах Российской Федерации в период 2002-2018 гг. // Фундаментальная и клиническая медицина. – Т. 4, № 3. – С. 68-77.

**Ясюкевич В. В., 2002:** Малярия в России и ее ближайшем географическом окружении: анализ ситуации в связи с предполагаемым изменением климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 18. – С. 142-157.

**Ясюкевич В. В., Попов И. О., 2020:** Расширение климатического нозоареала Крымской геморрагической лихорадки на территории России и соседних стран в условиях предполагаемого изменения климата // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 3. – С. 120-134.

**Ясюкевич В. В., Попов И. О., Титкина С. Н., Ясюкевич Н. В., 2018:** Уязвимость субъектов Российской Федерации в отношении распространения основных переносчиков иксодовых клещевых боррелиозов и клещевого энцефалита в условиях предполагаемого изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 29, № 4. – С. 8-28.

**Ясюкевич В. В., Попов И. О., Ясюкевич Н. В., 2019:** Моделирование изменений нозоареала и зоны повышенного эпидемического риска лихорадки Западного Нила на территории России в условиях ожидаемого изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 30, № 1-2. – С. 15-32.

**Ясюкевич В. В., Рыбина Е. А., Ясюкевич Н. В., Рудкова А. А., 2016а:** Оценки уязвимости здоровья населения Российской Федерации в отношении некоторых инфекционных и трансмиссивных заболеваний в региональном аспекте для первой половины XXI века // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 27, № 1. – С. 49-73.

**Ясюкевич В. В., Ясюкевич Н. В., Рудкова А. А. 2016б:** Сибирская язва // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 27, № 2. – С. 87-101.

## 2.3 Секторы экономики, виды экономической деятельности и инфраструктура

### 2.3.1 Добывающая промышленность

***Е. М. Акентьева***

На территории Российской Федерации добываются практически все известные виды полезных ископаемых. В составе добывающей промышленности страны выделяются две большие группы производств: добыча топливно-энергетических полезных ископаемых (нефти, газа, угля, торфа, урановой руды) и добыча других полезных ископаемых (руд черных и цветных металлов, нерудных полезных ископаемых, т.е. сырья для химической промышленности и производства строительных материалов, а также алмазов).

Как отмечается во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), добывающая промышленность стоит на первом месте по уровню вариабельности доходов, связанных с воздействием метеорологических факторов. Особенности воздействия климатических изменений на объекты и процессы в добывающей промышленности зависят главным образом от способа добычи полезных ископаемых (закрытого, т.е. с использованием скважин и шахт, или открытого – карьерного), физических и химических свойств добываемого сырья и последствий для окружающей среды.

#### 2.3.1.1 Добыча нефти и газа

Разработка месторождений нефти и газа производится в основном путем строительства буровых вышек для создания нефтяных и газовых скважин. Наибольшее развитие нефтегазовый сектор России получил в Арктической зоне. Поэтому наиболее значительные климатические риски для устойчивого функционирования нефтегазового комплекса в этом регионе обусловлены экстремальными температурно-ветровыми условиями (табл. 2.3.1.1), а также медленными климатическими изменениями, приводящими к повышению уровня моря, таянию многолетнемерзлых пород, разрушению берегов и прибрежной инфраструктуры. В большинстве районов добычи углеводородов примерно 60% аварий связано с метеорологическими факторами (Руководство, 2008).

Повышение температуры воздуха в Арктической зоне России, выражающееся, в частности, в уменьшении числа дней с температурой воздуха ниже критических для работы нефтегазового комплекса значений (рис. 2.3.1.1), в целом благоприятно для функционирования этого комплекса, т.к. при этом улучшаются условия работы на открытом воздухе, уменьшаются простои в работе, снижаются эксплуатационные расходы, сокращается потребление энергии за отопительный период.

***Таблица 2.3.1.1***

*Критические значения характеристик температуры воздуха и скорости ветра для функционирования нефтегазового комплекса (Руководство, 2008)*

| | |
|---|---|
| Температура воздуха ниже –15 °С | Осложняется сварка полиэтиленовых труб (проведение сварочных работ необходимо проводить в отапливаемых помещениях) |
| Температура воздуха ниже –25 °С | Увеличивается загустение нефти и затрудняется ее перекачивание |
| Температура воздуха ниже –30 °С | Необходимо утепление трубопроводов и использование морозостойких материалов, следовательно, происходит удорожание работ |
| Температура воздуха ниже –40 °С | Требуется использование легированных сталей, образуются пробки и свищи в трубопроводах. Прекращаются работы на открытом воздухе |
| Скорость ветра более 22 м/с (независимо от температуры воздуха) | Прекращается монтаж буровых вышек, затрудняется сварка труб, прекращается ремонт скважин и наземных сооружений |

Потепление климата высоких широт протекает на фоне большой временной изменчивости климатических характеристик (от суток до десятилетий) на региональном и локальном уровнях. Низкие температуры воздуха по-прежнему возможны, но их вероятность уменьшается (Хлебникова и др., 2018). Этот фактор важно учитывать при актуализации нормативных документов, содержащих климатические показатели. Так, например, анализ нормативных документов, определяющих условия исполнения, эксплуатации, хранения и транспортировки машин и других технических изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды (ГОСТ, 2013, 2021), показал, что, несмотря на потепление, границы климатического района с холодным климатом, определенные по средним месячным температурам воздуха января и июля и по среднему из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха, к настоящему времени существенно не изменились. Это связано с широким диапазоном температурных условий, заложенных в ГОСТах.

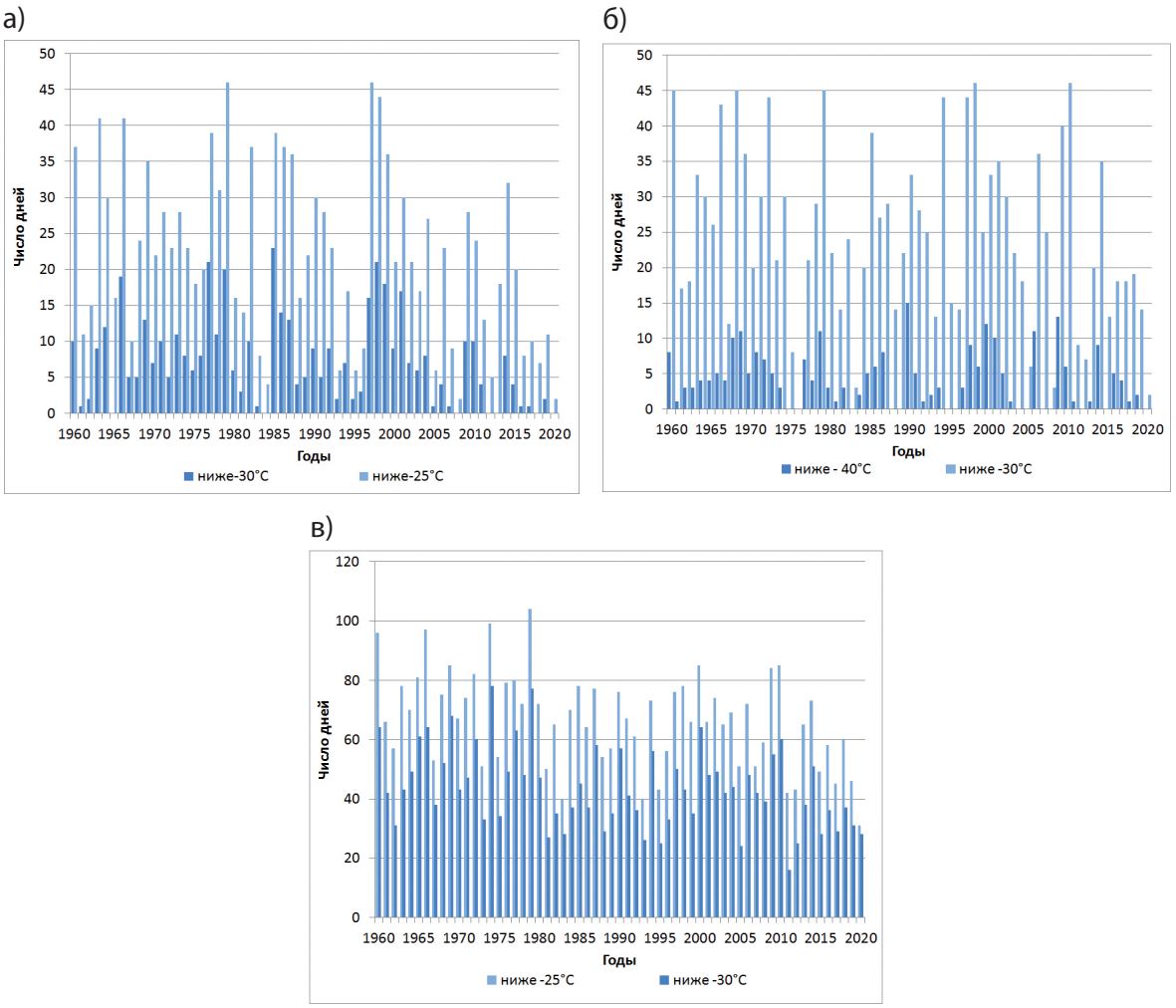



***Рис. 2.3.1.1*** *Число дней с температурой воздуха ниже различных пороговых значений в 1960-2020 гг.:*
*а) ниже –30 °С и –25 °С, Варандей (Ненецкий автономный округ);*
*б) ниже –40 °С и –30 °С, Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ);*
*в) ниже –30 °С и –25 °С, Игарка (Красноярский край)*

По прогнозным оценкам, выполненным с помощью региональной климатической модели ГГО (Shkolnik et al., 2018), сокращение продолжительности периода с температурой ниже –30 °С к середине XXI века может составить на территории Северной Евразии от 10 до 40 дней, а индекс потребления энергии сократится на 10-20% (Хлебникова и др., 2018) (рис. 2.3.1.2).

Увеличение температуры воздуха имеет и свои негативные последствия для добывающей промышленности и ее логистической инфраструктуры. Так, уменьшение ледовитости арктических морей, обусловленное потеплением климата, приводит к усилению береговой эрозии из-за более частого воздействия штормов, особенно на побережье Берингова и Карского морей, и создает угрозу портовым причалам. В этом отношении показателен пример порта Варандей, действующего круглогодично и являющегося самым северным нефтяным терминалом в мире (ACIA, 2004). Повреждения, нанесенные побережью при строительстве и эксплуатации портовой инфраструктуры, увеличили естественную скорость эрозии береговой линии, достигающей здесь 2-3 м в год (Росги-

дромет, 2014). Таким образом, районы, уже затронутые деятельностью человека, часто становятся более уязвимыми для воздействий изменения климата.

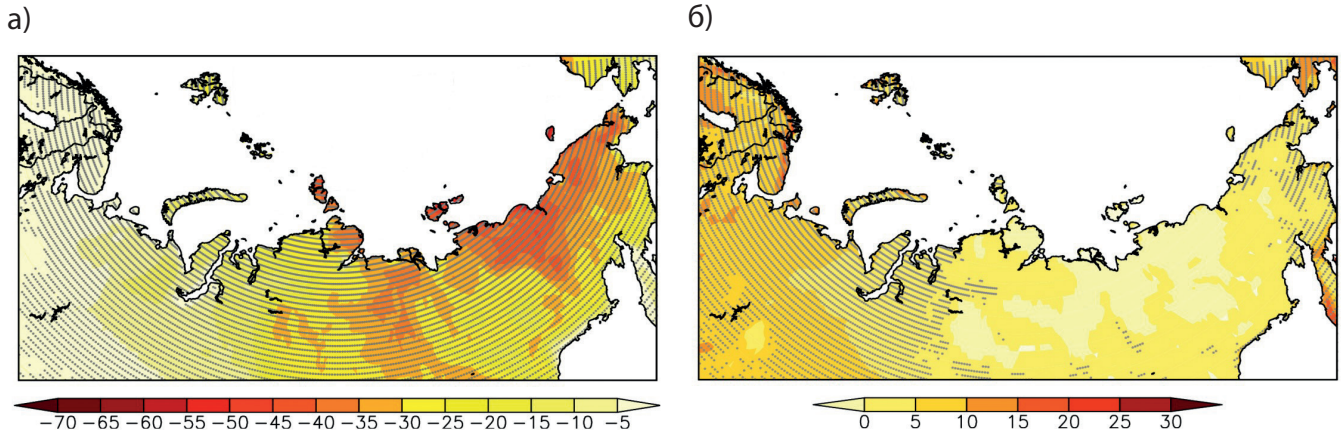



***Рис. 2.3.1.2*** *Изменение средних многолетних значений климатических показателей к середине XXI века по отношению к базовому периоду 1981-2000 гг., по данным региональной климатической модели ГГО; сценарий RCP8.5 (Хлебникова и др., 2018).*

*а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С;*

*б) индекс потребления энергии (%) за отопительный период*

Более теплая погода провоцирует и риски уменьшения добычи газа, т.к. рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С (рис. 2.3.1.3а) приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива (Руководство, 2008).

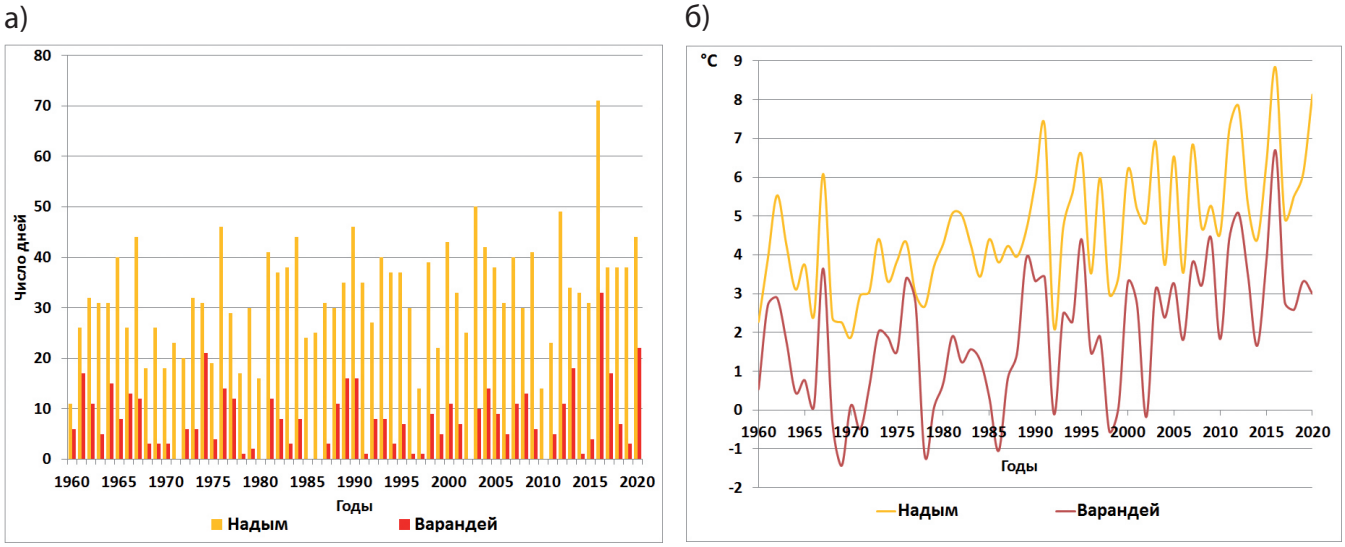



***Рис. 2.3.1.3*** *Изменение температурного режима теплого периода в 1960-2020 гг.:*

*а) число дней с температурой воздуха выше 15 °С. Варандей (Ненецкий автономный округ), Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ);*

*б) средняя температура теплого периода (апрель – октябрь) в 1960-2020 гг. Варандей (Ненецкий автономный округ), Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ) (°С)*

Рост температуры воздуха в теплый период года (рис. 2.3.1.3б) может увеличить вероятность лесных пожаров, угрожающих объектам нефтегазового комплекса, а также способствовать образованию смерчей, которые раньше в Арктической зоне России не отмечались.

Более теплый климат способствует и преждевременному таянию «зимников» (в том числе речных), часто являющихся основными дорогами в районах нефте- и газодобычи на севере и северо-востоке Российской Федерации. При этом значительно сокращается время их эксплуатации, что создает дополнительные риски для снабжения нефтегазового комплекса (Росгидромет, 2014).

Изменение скорости ветра носит более сложный характер. На фоне слабого уменьшения средних скоростей ветра с середины 1970-х годов максимальные скорости ветра в северных регионах Западной Сибири не меняются или несколько увеличиваются (рис. 2.3.1.4). Это может негативно отражаться как на условиях работ на открытом воздухе, так и на ветровых нагрузках на буровые установки.

Важной причиной снижения эксплуатационного ресурса практически всех видов оборудования для нефте- и газодобычи являются коррозионные повреждения. Увеличение продолжительности выпадения жидких и смешанных осадков, изменение относительной влажности и температуры воздуха являются основными факторами, определяющими возрастание коррозионной агрессивности атмосферы и интенсивности разрушения металлических конструкций. Существуют различные виды коррозии металлов – сухая (под действием температуры и загрязненного воздуха), влажная (наиболее активна при относительной влажности более 70%), мокрая – наиболее быстрый и опасный тип коррозии (при непосредственном соприкосновении с водой, т.е. с туманом, осадками). В большинстве случаев все виды атмосферной коррозии воздействуют одновременно. При этом наиболее значимым фактором является продолжительность периодов с относительной влажностью более 70% при температуре воздуха выше –1 °С и периодов с жидкими и смешанными осадками (ГОСТ, 1991, 2018). В настоящее время рост обоих этих показателей отмечается во многих районах добычи углеводородов (рис. 2.3.1.5, 2.3.1.6).

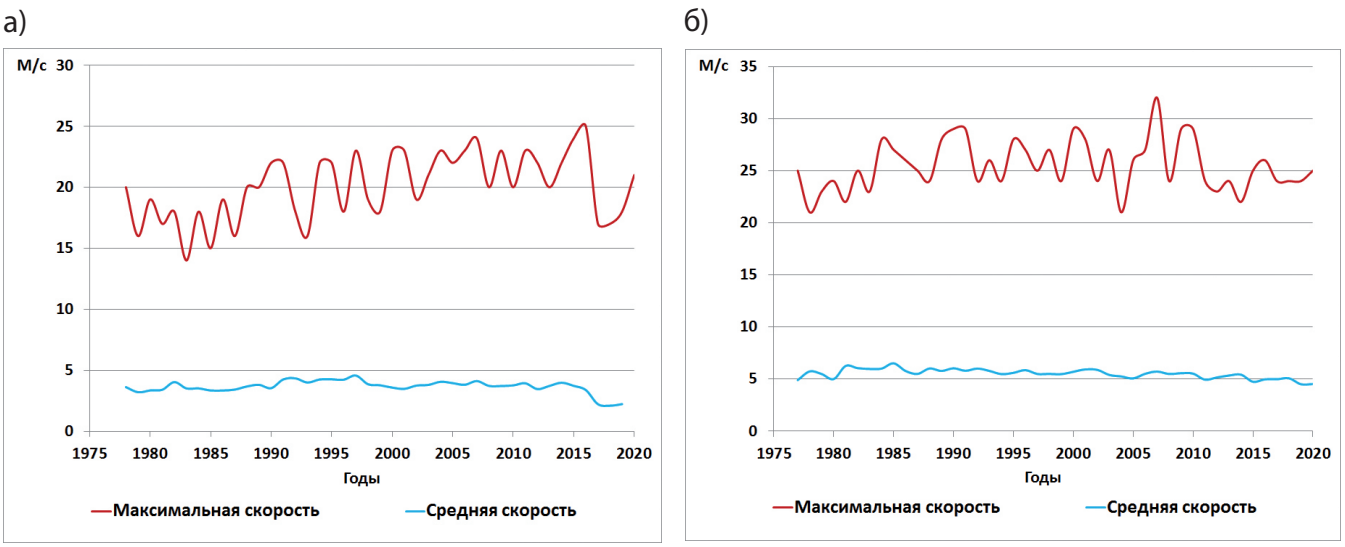
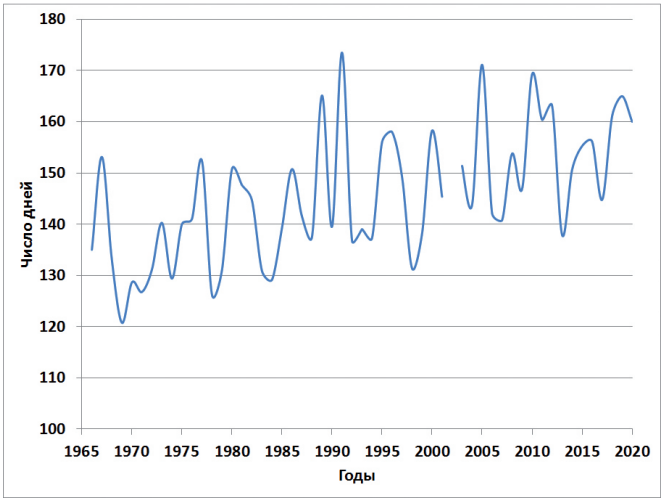



***Рис. 2.3.1.4*** *Средняя и максимальная скорости ветра в 1977-2020 гг. (м/с)*
*а) Надым; б) Новый Порт (Ямало-Ненецкий автономный округ)*

Большинство объектов газовой и нефтяной отраслей находятся в зоне многолетней мерзлоты. В настоящее время сохраняется тенденция увеличения мощности ее сезонно-талого слоя. Последствия таяния многолетней мерзлоты носят комплексный характер и обуславливают транспортные риски (разрушение автомобильных и железных дорог, трубопроводов, ухудшение состояния взлетно-посадочных полос), а также риски снижения производительности нефтяных скважин, т.к. при таянии мерзлоты скважины деформируются, а их последующее восстановление приводит к потерям добычи нефти на 10-20% (Росгидромет, 2017) (см. главу 2.3.8).

Особое значение имеют последствия изменений климата для состояния трубопроводов. В зоне сезонного промерзания грунтов аварийные разрушения трубопроводов часто происходят в районах со сложными гидрогеологическими условиями, для которых характерен высокий риск возникновения оползневых и селевых процессов. Важнейшим фактором, определяющим степень развития этих процессов, является количество и интенсивность осадков. В таких условиях ожидаемое увеличение сезонных сумм осадков и особенно их интенсивности в теплый сезон является серьезным дополнительным фактором риска, который необходимо принимать во внимание при эксплуатации существующих и проектировании новых трубопроводов (Росгидромет, 2017), (см. главу 2.3.6).

а)




б)

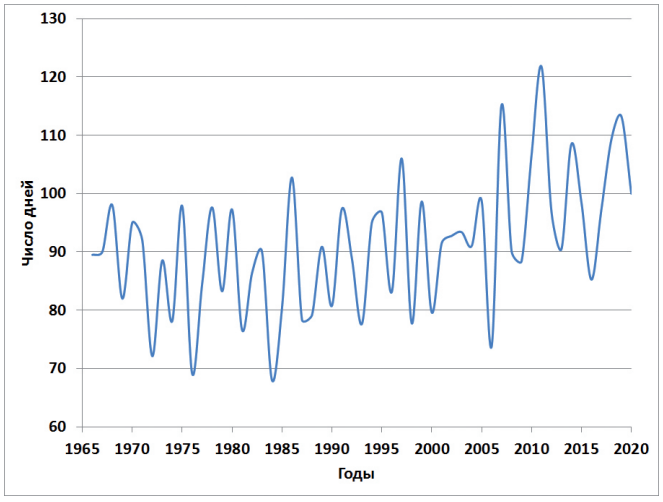



***Рис. 2.3.1.5*** *Годовое число дней с относительной влажностью воздуха более 70% при температуре воздуха выше –1 °С в 1965-2020 гг. а) Варандей (Ненецкий автономный округ); б) Игарка (Красноярский край)*

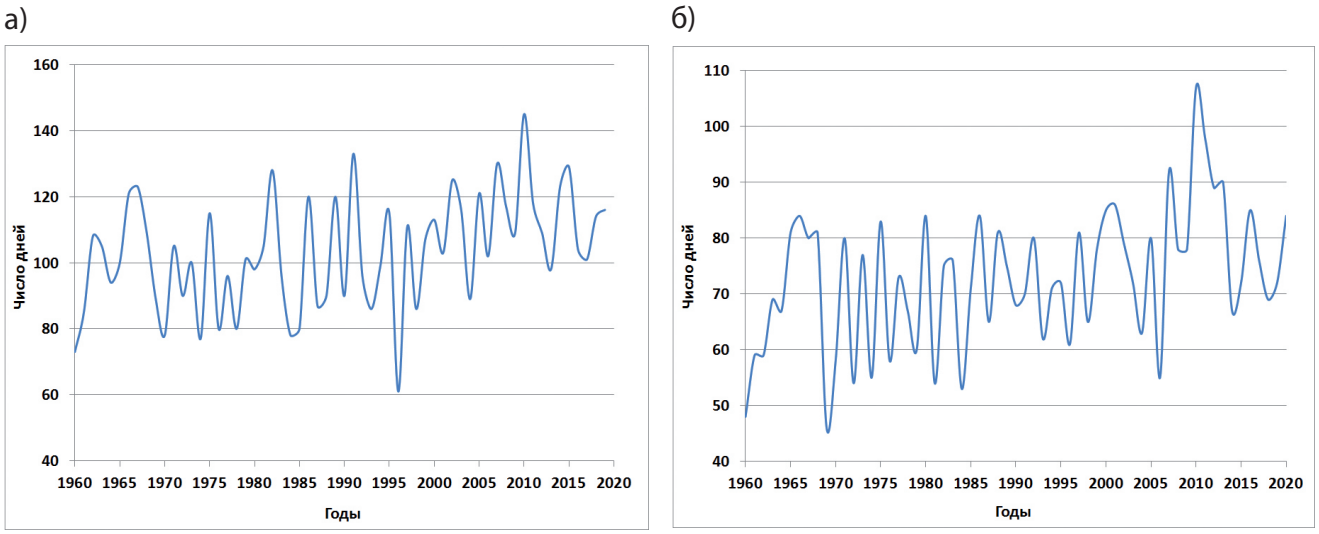



***Рис. 2.3.1.6*** *Годовое число дней с жидкими и смешанными осадками в 1960-2020 гг.*

*а) Елецкая (Республика Коми); б) Норильск (Красноярский край)*

### 2.3.1.2 Добыча угля, металлических руд, алмазов

Погодно-климатические риски, характерные для добычи полезных ископаемых в карьерах и шахтах, в значительной степени обусловлены изменением режима увлажнения. Так, частые дожди и связанное с ними усиление эрозии земной поверхности могут повлиять на устойчивость склонов вблизи карьеров. Увеличение сумм осадков и числа дней с жидкими и смешанными осадками, наблюдающееся во второй половине XX – начале XXI века во многих районах добычи каменного и бурого угля, приводит к дополнительному намоканию угля на открытых топливных складах (Росгидромет, 2017). Это уменьшает тепловую экономичность энергоустановок, использующих это топливо, затрудняет его транспортировку. Изменение режима увлажнения особенно характерно для Сибирского ФО, где сосредоточено более 80% запасов угля России (рис. 2.3.1.7), а также для Дальневосточного ФО.

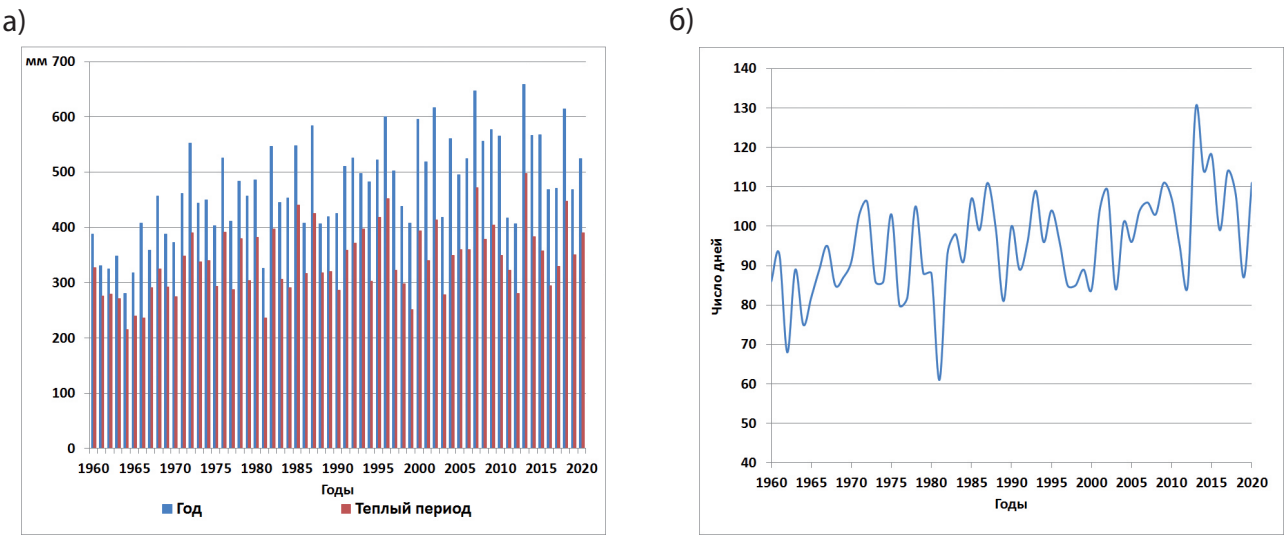



***Рис. 2.3.1.7*** *Изменение режима увлажнения в Кемерово (Кузбасс) в 1960-2020 гг.*

*а) сумма осадков за год и теплый период (апрель – октябрь) (мм);*

*б) число дней с жидкими и смешанными осадками*

Увеличение испаряемости, происходящее одновременно с ростом температуры воздуха, создает в засушливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов (рис. 2.3.1.8). По данным региональной климатической модели ГГО, к середине XXI века в южных районах Европейской России и Западной Сибири ожидается небольшое (на 2-4 дня), но значимое увеличение продолжительности сухих периодов (с суточной суммой осадков менее 1 мм) в течение теплого периода года (Хлебникова и др., 2019).

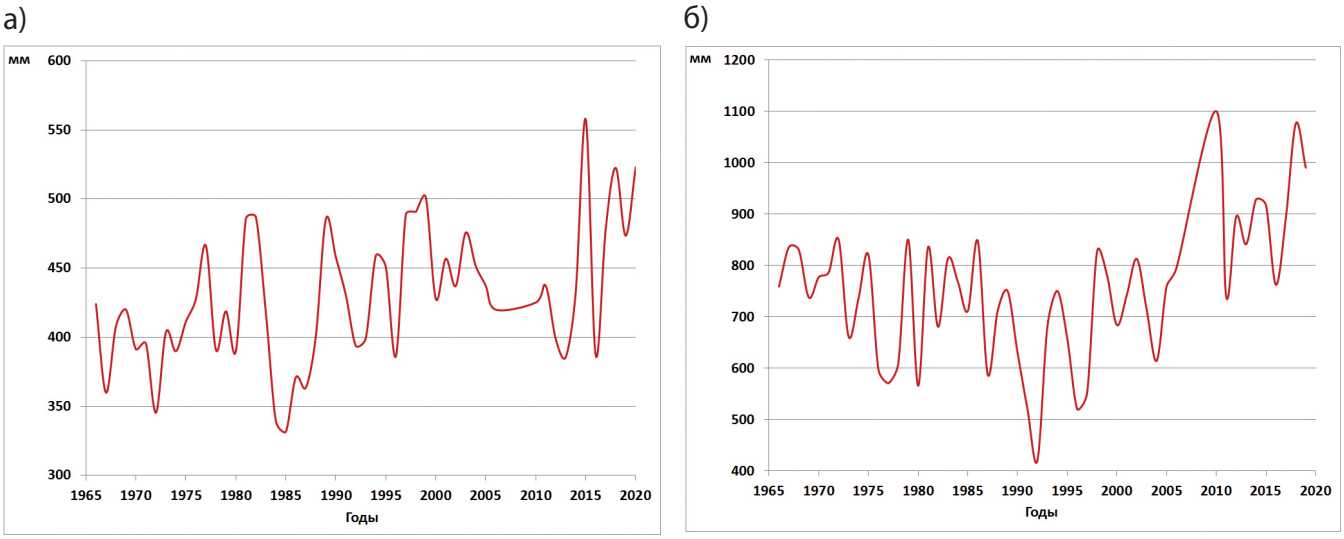



***Рис. 2.3.1.8*** *Годовая испаряемость (мм). а) Кемерово; б) Ростов-на-Дону*

В последние десятилетия во многих регионах страны, в том числе и там, где добыча угля и других полезных ископаемых производится шахтным методом, наблюдается резкое повышение интенсивности осадков (рис. 2.3.1.9). Интенсивные осадки, выпадающие за короткие интервалы времени, представляют значительную опасность для работы шахт и могут приводить к катастрофическим последствиям, т.к. шахтные дренажные системы были спроектированы на основании климатических данных второй половины XX века. Так, экстремальный дождь (82 мм за сутки), выпавший в августе 2018 г. в районе г. Мирный (Республика Саха), затопил шахту, где производилась добыча алмазов. Сумма осадков при этом не только значительно превысила предыдущий суточный максимум (52 мм), но и практически сравнялась с его расчетным значением, возможным один раз в 100 лет. Системы водоотведения в шахте не были рассчитаны на такое количество осадков, что привело к гибели людей, попаданию загрязненной воды в систему городского водоснабжения, наложению значительных штрафов на добывающую компанию и закрытию шахты.

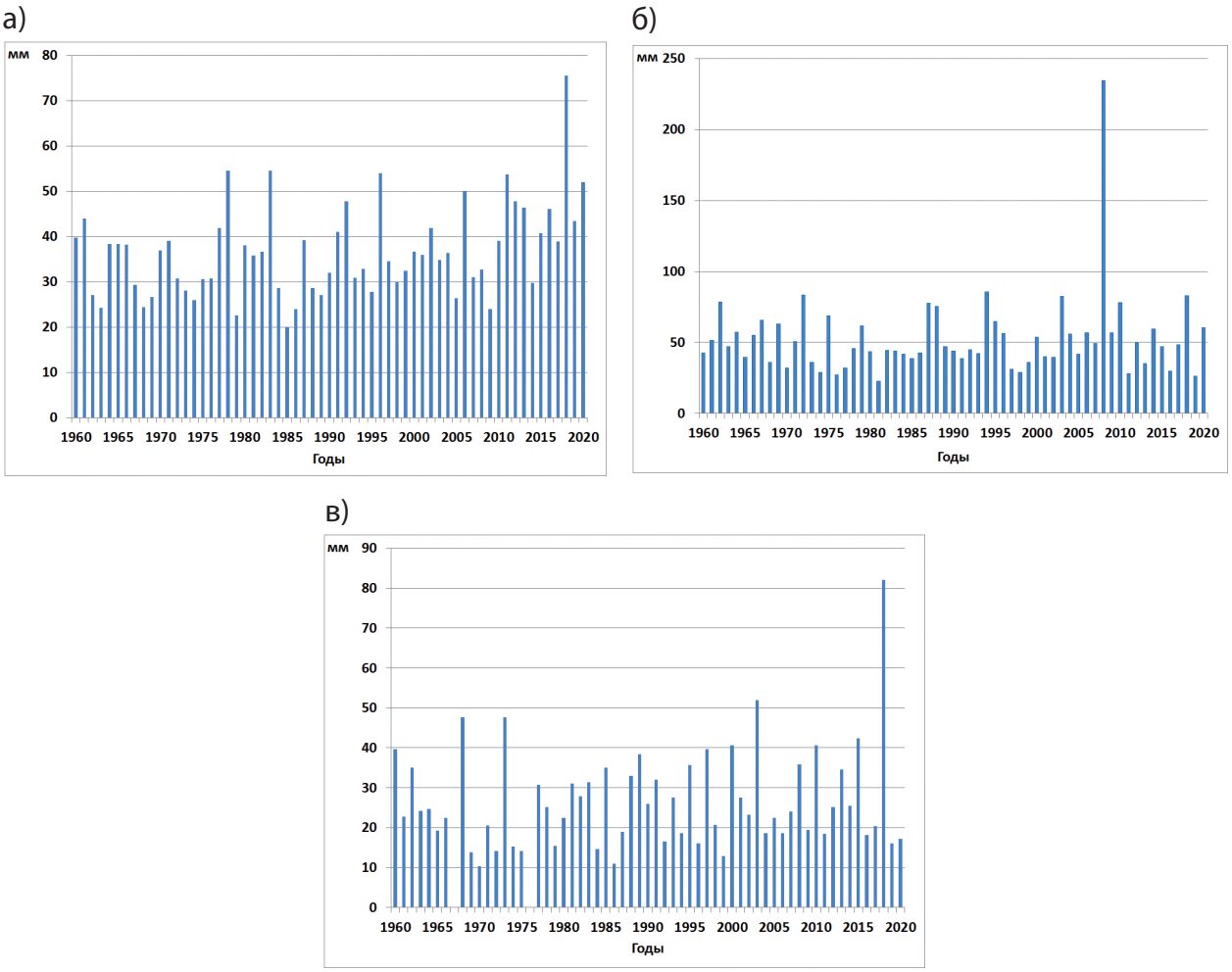



***Рис. 2.3.1.9*** *Суточный максимум осадков, мм, в 1960-2020 гг.*
*а) Ростов-на-Дону (Ростовская область); б) Мазаново (Амурская область)*
*в) Мирный (Республика Саха)*

По данным региональной климатической модели ГГО, суточные максимумы осадков возрастут к концу XXI века на значительной территории России, прежде всего в Якутии и северо-восточных регионах страны, на 10-20% (рис. 2.3.1.10) (Хлебникова и др., 2018, 2019; Катцов и др., 2020).

Изменение режима осадков и испарения необходимо также учитывать при проектировании и эксплуатации хвостохранилищ – гидротехнических сооружений, обуславливающих значительные экологические риски для окружающей среды. Риски, связанные с обильными осадками, включают: обрушение дамбы хвостохранилища, сброс загрязненной воды в прилегающие водоемы, сопутствующие затраты на восстановление, увеличение экологической ответственности, воздействие на здоровье и безопасность населения (ГОСТ, 2019; Руководящие принципы, 2014; Глобальный отраслевой стандарт, 2020). Основные мероприятия по безопасности хвостохранилищ должны быть направлены на минимизацию ущерба от их разрушения, сокращение фильтрационных потерь и потерь от пыления. Эти мероприятия должны планироваться на основе детальной климатической информации о современном и будущем температурно-влажностном режиме в районе изысканий.

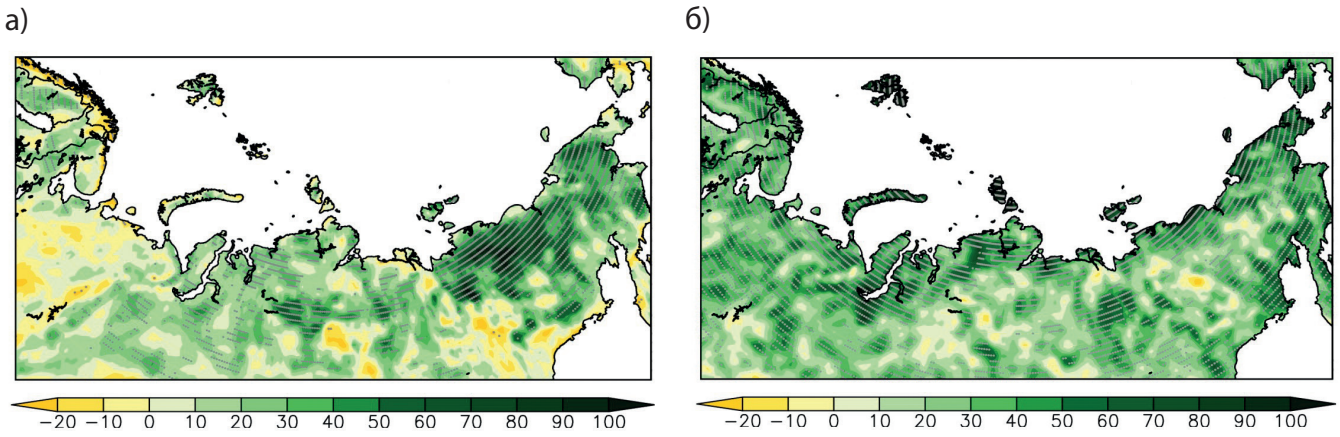



***Рис. 2.3.1.10*** *Изменение средних многолетних значений суточного максимума осадков к концу XXI века по отношению к базовому периоду 1981-2000 гг., по данным региональной климатической модели ГГО; сценарий RCP8.5 (Хлебникова и др. 2018)*

*а) максимум суточных сумм осадков при отрицательной температуре воздуха,%;*

*б) максимум суточных сумм осадков при положительной температуре воздуха,%*

Эффективное и безопасное удаление отходов горнодобывающих предприятий сопряжено с решением сложных технических и природоохранных задач как в период эксплуатации, так и в период после вывода из эксплуатации. Этот вопрос необходимо особенно тщательно рассматривать в связи с изменением климата, которое может привести к повышению вероятности промышленных аварий в результате таких стихийных бедствий, как наводнения, засухи, природные пожары, смерчи и т.д. (Mason et al., 2013; Climate risk assessment, 2015).

### 2.3.1.3 Направления адаптации добывающей промышленности к изменениям климата

Изменение климата заставляет горнодобывающие компании более детально оценивать риски, связанные с климатическими факторами, т.к. потери вследствие аварий практически всегда превышают затраты на обеспечение надлежащего уровня эксплуатационной безопасности и контроля для предотвращения инцидентов на объектах добывающей промышленности. Решению этих вопросов посвящено большое число исследований (Climate adaptation, 2014; Smith, 2013; Руководящие принципы, 2014; Climate Change, 2019; Mavrommatis et al., 2019; Resilience, 2021 и др.).

Анализ этих работ позволяет обозначить следующие основные превентивные адаптационные меры в добывающей промышленности:

Для каждого объекта добывающей промышленности необходимы индивидуальные климатические прогнозы, которые позволят создать реестр текущих и будущих рисков и разработать стратегии адаптации на уровне объекта для повышения устойчивости объекта и прилегающих к нему регионов к изменению климата. Оценка рисков может выполняться по следующим основным позициям:

- анализ возможных аварий, связанных с экстремальными погодными явлениями (например, ливнем, засухой) или с общим потеплением (таянием снега, мерзлоты);
- оценка вероятности аварий при разных сце-

нариях изменения климата;
- оценка степени устойчивости основных объектов инфраструктуры к разным типам воздействия;
- потенциальная цена аварий;
- мониторинг рисков и предупреждения/восстановления последствий аварий.

Должен быть определен системный подход к управлению безопасностью хвостохранилищ в течение всего их жизненного цикла «планирование – строительство –эксплуатация – закрытие – рекультивация» с учетом изменения климата.
Целесообразно создавать резервные водохранилища для хранения технологических растворов и сбора излишней дождевой воды.

В районах с дефицитом водных ресурсов необходимо уделять приоритетное внимание сокращению потерь от испарения с поверхности хвостохранилищ, чтобы избежать их высыхания и пыления.

В условиях повышения температуры воздуха необходим поиск новых решений для эффективного охлаждения подземных сооружений шахт.

Большинство инициатив по адаптации к изменению климата в горнодобывающей промышленности сосредоточены на физических (инфраструктурных) рисках изменения климата. Менее развито детальное понимание репутационных и социальных рисков, которые постепенно приобретают все большее значение. Поэтому все более актуальными становятся инвестиции горнодобывающих компаний в комплексные программы управления водосборными бассейнами, улучшение местного водоснабжения, защиту существующих источников воды и окружающей среды в целом.

Существенные риски могут возникать на послеоперационной фазе шахт и карьеров, т.к. большинство из них имеют относительно короткий срок службы и не предполагается, что они будут работать, когда проявятся наиболее серьезные последствия изменения климата. С эксплуатационной точки зрения, эти шахты могут быть спроектированы без учета будущего климата. Однако после вывода таких объектов из эксплуатации и их закрытия реальным становится риск разрушения конструкций под воздействием происходящих климатических изменений.

Основные адаптационные меры в области климатического обслуживания добывающей промышленности заключаются в обновлении климатических параметров, входящих в нормативные документы по проектированию, строительству и эксплуатации объектов добычи и транспортировки полезных ископаемых, и включении в эти документы информации о наблюдаемых и ожидаемых изменениях климатических условий в районах проведения работ. Для повышения качества используемой климатической информации необходимо расширять сеть гидрометеорологических станций, проводящих наблюдения за температурой почвы, глубиной ее промерзания, а также интенсивностью осадков.

## Список литературы


**Глобальный отраслевой стандарт управления хвостохранилищами, 2020.** –Международный совет по горнодобывающей промышленности и металлургии. – 44 с. https://globaltailingsreview.org/resources/

**ГОСТ** 15150-69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с изменениями). – М.: Стандартинформ, 2013. – 60 с.

**ГОСТ** 16350-80 Государственный стандарт СССР. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. – М.: Издательство стандартов, 2021. я 150 с.

**ГОСТ** ISO 9223-2017. Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. – М.: Стандартинформ, 2018. – 17 с.

**ГОСТ** Р 55100-2012. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в горнодобывающей промышленности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.

**ГОСТ** СССР. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 44 с.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – М.: Росгидромет, 2014. – 1009 с.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова. – СПб.: ООО «Амирит». – 106 с.

**Руководство** по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами / Под редакцией Н. В. Кобышевой. – СПб., 2008. – 336 с.

**Руководящие принципы** и надлежащая практика обеспечения эксплуатационной безопасности хвостохранилищ. – ЕЭК ООН, 2014. – 48 с.

**Хлебникова Е. И., Катцов В. М., Пикалева А. А., Школьник И. М., 2018:** Оценка климатических факторов экономического развития территории российской Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 5-17.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019:** Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI в.: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 11-23.

**ACIA, 2004:** Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report – Cambridge University Press, 140 p.

**Climate Adaptation in the Canadian Mining Sector. Mining Association of Canada, 2014:** pp. 31 https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/02/Climate_Adaptation_in_the_Canadian_Mining_Sector_2014.pdf.

**Climate Change, 2019:** – The Mining Association of Canada. Towards Sustainable Mining. Tailings Management Protocol. Version date: February 2019. https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/03/Tailings-Management-Protocol_2019-final.pdf

**Climate Risk Assessment for the Oil & Gas Sector. Northeastern British Columbia. 2015:** https://retooling.ca/wp-content/uploads/2020/10/Climate_Assessment_NEBC_2015_web.pdf.

**Mason L., Unger C., Lederwasch A., Razian H., Wynne L., Giurco D., 2013:** Adapting to climate risks and extreme weather: a guide for mining and minerals industry professionals – National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast, 79 p.

**Mavrommatis E., Damigos D., Mirasgedis S., 2019:** Towards a Comprehensive Framework for Climate Change Multi-Risk Assessment in the Mining Industry // Infrastructures, v. 4, № 3, 28 p. DOI:10.3390/infrastructures4030038

**Resilience in the Mining and Energy sector. 2021.** https://retooling.ca/taking-action/mining-and-energy/

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, v. 50, № . 1-2, pp. 215-230. DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6

**Smith M. H., 2013:** Assessing Climate Change Risks and Opportunities: Mining and Minerals Processing sector. DOI:10.13140/RG.2.1.2802.8403

## 2.3.2 Сельское хозяйство

***В. Н. Павлова***
***Г. Б. Пигольцина, Е. Н. Попова***

**Введение**

Исследования, связанные с погодно-климатическими факторами и изменением климата, указывают на возрастание значимости гидрометеорологических факторов в устойчивом развитии сельскохозяйственного производства. Ожидается, что Россия в ближайшие десятилетия останется одним из ведущих экспортеров на мировом рынке зерна, обеспечивая существенный вклад в удовлетворение ожидаемого спроса на зерно (FAO, 2017; USDA-FAS, 2016).

На территории России, вследствие наблюдающегося потепления, возможны изменения частоты и (или) интенсивности экстремальных явлений погоды (наводнений, ураганов, засух и др.) (Росгидромет, 2014). Уже сейчас на большей части ЕТР наблюдается увеличение числа суток с аномально большим количеством осадков зимой и их уменьшение летом. Также наблюдается увеличение засушливости в большей части сельскохозяйственных регионов, в частности в основных регионах производства зерновых (Росгидромет, 2014, 2017; Национальный доклад, 2019, 2021; Золотокрылин и др., 2014; Переведенцев и др., 2018).

Зависимость от погодных условий делает производство сельскохозяйственной продукции неустойчивым (Alcamo et al., 2007; Liefert, 2002; Росгидромет, 2017; Нефедова, 2017). В работе (Lobell et al., 2011) отмечается, что в последнее время тренды средних годовых и сезонных температур уже оказали негативное влияние на валовый сбор урожаев в мире.

Наблюдаемые в настоящее время изменения климата на территории России, связанные с глобальным потеплением, продолжают вызывать изменения экологических и фенологических особенностей и расширение границ ареалов опасных вредителей и возбудителей болезней сельского хозяйства, что приводит к экономическим рискам значительного снижения урожая сельскохозяйственной продукции. Большой вред урожаю причиняет наблюдаемая смена пищевых предпочтений у отдельных представителей фитофагов, которые с дикорастущих видов растений переходят на питание сельскохозяйственными культурами.

В этих условиях важной задачей является получение обоснованных оценок тенденций изменения агроклиматических условий и продуктивности сельскохозяйственных культур на обширной территории земледельческой зоны России и особенно в основных зерновых регионах, которые должны явиться основой информационно-аналитического обеспечения адаптации сельского хозяйства России к наблюдаемому и прогнозируемому изменению климата в соответствии с Национальным планом адаптации (Национальный план, 2019; Катцов и др., 2016).

Для сохранения будущего урожая крайне важно ведение усиленного мониторинга за распространением и изменением экологических свойств наиболее опасных вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений. Для обеспечения национальной безопасности важным приоритетом становится моделирование климатических ареалов и зон массового размножения вредоносных организмов на основе выявленных климатических и агроклиматических индексов, рассчитанных по данным о наблюдаемых и будущих изменениях в климатической системе на территории Российской Федерации.

### 2.3.2.1 Наблюдаемые изменения агроклиматических ресурсов и продуктивности сельскохозяйственных культур на территории земледельческой зоны России

**Термический режим**

Рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур продолжается практически на всей территории земледельческой зоны России. Исключение составляют отдельные области Дальнего Востока и Восточной Сибири.

Сумма температур воздуха за период с температурой выше 10 °С (или сумма активных температур) характеризует период активной вегетации основных сельскохозяйственных культур. В основных сельскохозяйственных регионах умеренной зоны это период с мая по август. Сумма температур воздуха выше 5 °С характеризует период вегетации сельскохозяйственных культур от даты перехода через 5 °С весной до даты перехода через 5 °С осенью, т.е. охватывает весь теплый период года. Дата возобновления вегетации озимых зерновых культур весной примерно совпадает с устойчивым переходом температуры через 5 °С в весенний период.

Суммы температур выше 5 и 10 °С за последние два десятилетия увеличились в среднем по ЕТР на ~250 °С. В Южном ФО наблюдается максимальный рост этих показателей, который представляется значительным (290-320 °С). Продолжительность периода вегетации увеличилась в среднем на одну декаду, а вегетационный период зерновых культур сократился на ~5 суток на фоне роста температуры воздуха (табл. 2.3.2.1).

***Таблица 2.3.2.1***

*Изменение показателей теплообеспеченности сельскохозяйственных культур за период 1998-2017 гг. относительно средних значений за базовый период 1961-1990 гг. (Павлова и др., 2020б)*

| Федеральный округ | Сумма температур воздуха, °С | | Дата перехода весной, сут., через | | Продолжительность периода, сут. | | Продолжительность периода вегетации пшеницы, сут. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | >10 °С | >5 °С | 10 °С | 5 °С | T>10 °С | T>5 °С | яровой | озимой |
| Центральный | 239±17 | 248±19 | –4±0,5 | –5±0,6 | 8±0,6 | 10±0,7 | –4±1,0 | –3±0,5 |
| Приволжский | 202±14 | 219±16 | –2±0,9 | –3±0,5 | 6±0,9 | 9±1,4 | –6±2,2 | –4±1,4 |
| Южный | 287±41 | 317±41 | –2±0,7 | –9±2,0 | 7±1,5 | 10±2,7 | –4±1,8 | –4±1,4 |

Пояснение: ± указывает на 95%-й доверительный интервал

Согласно оценкам, приведенным в работе (Шашко, 1967), увеличение сумм температур в пределах от 200 до 300 °С позволяет перейти от раннеспелых сортов зерновых (ячменя, пшеницы, овса) к более позднеспелым сортам, как правило более урожайным. В центрально-черноземных областях, например, стало возможным выращивать кукурузу на зерно, фасоль, подсолнечник, просо, позднеспелые сорта яровой пшеницы и ярового ячменя.

Оценки тенденций (тренды) показателей термического режима за весь период глобального потепления также отражают рост термических ресурсов в земледельческой зоне России. Оценки линейного тренда сумм активных температур воздуха (Т > 10 °С) показывают, что положительная тенденция к росту этого показателя за последние десятилетия сохраняется на ETP и на ATP. При этом оценки трендов на ETP изменяются в диапазоне от 90 до 160 °С за 10 лет, что выше соответствующих трендов на ATP, где диапазон их изменений составляет ~50 °С за 10 лет (табл. 2.3.2.2).

***Таблица 2.3.2.2***

*Оценки линейных трендов показателей термического и влажностного режимов за период 1976-2020 гг. (Росгидромет, 2021)*

| Федеральный округ | Средняя температура воздуха (Т), °С/10 лет | | Дата перехода через 5°С весной, сут./10 лет | Продолжительность периода Т>5 °С, сут./10 лет | Сумма температур, °С/10 лет | | Сумма осадков, мм/10 лет | | ГТКмай–авг., ед./10 лет | ИС, ед./10 лет |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | весна | лето | | | >5°С | >10°С | весна | лето | | |
| Северо-Западный | 0,4 | 0,4 | –1,6 | 4,0 | 94 | 103 | 3,5 | 1,1 | –0,03 | 0,02 |
| Центральный | 0,5 | 0,6 | –1,5 | 4,6 | 124 | 125 | 4,0 | –9,0 | –0,08 | 0,05 |
| Приволжский | 0,5 | 0,4 | –1,1 | 3,7 | 93 | 89 | 6,0 | –8,8 | –0,07 | 0,05 |
| Южный | 0,4 | 0,8 | –4,2 | 6,0 | 177 | 159 | 3,2 | –8,4 | –0,04 | 0,07 |
| Северо-Кавказский | 0,4 | 0,5 | –3,9 | 5,9 | 145 | 125 | 2,6 | –3,4 | –0,02 | 0,01 |
| Уральский | 0,5 | 0,2 | –1,2 | 2,7 | 54 | 55 | 6,7 | 1,2 | –0,01 | 0,01 |
| Сибирский | 0,8 | 0,3 | –2,5 | 3,4 | 61 | 53 | 4,7 | 3,2 | 0,00 | 0,00 |
| Дальневосточный | 0,4 | 0,2 | –1,6 | 2,9 | 60 | 63 | 5,6 | 7,6 | 0,02 | 0,01 |
| Российская Федерация в целом | 0,5 | 0,4 | –1,9 | 3,8 | 86 | 85 | 5,0 | –0,6 | –0,02 | 0,03 |

*Примечание*: ГТК – гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, ИС – радиационный коэффициент сухости М. И. Будыко

За период потепления с 1976 г. в земледельческой зоне России оценка линейной скорости роста для суммы температуры воздуха в период активной вегетации составляет 85 °С за 10 лет. Продолжительность периода вегетации (Т > 5 °С) растет с разной по регионам скоростью, от ~3 суток за 10 лет в Уральском ФО до ~6 суток за 10 лет в Южном и Северо-Кавказском ФО (табл. 2.3.2.2, рис. 2.3.2.1).

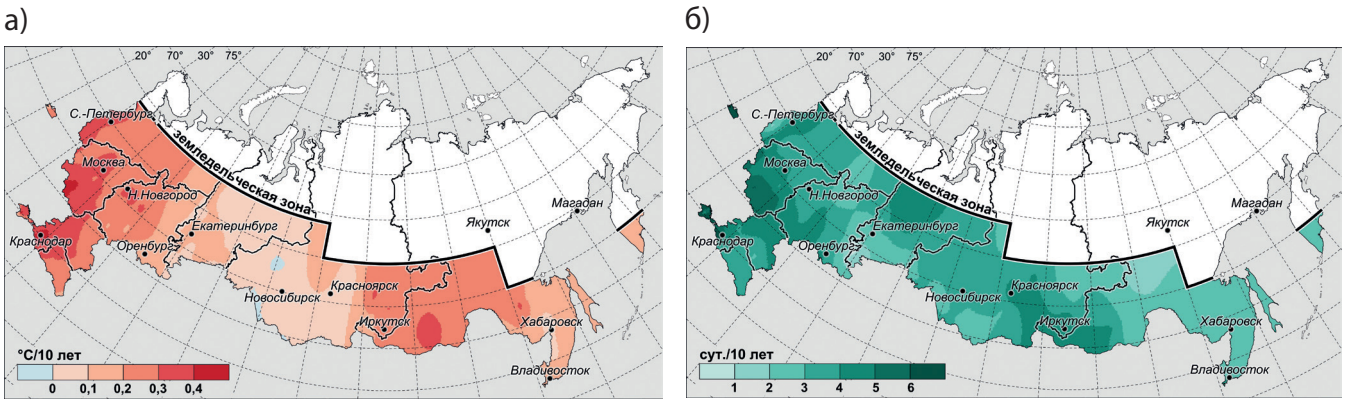



***Рис. 2.3.2.1*** *Скорость изменения (линейный тренд) показателей термического режима за 1976-2020 гг.: а) средняя температура воздуха, °С/10 лет; б) продолжительность теплого периода года (Т > 5 °С), сут./10 лет (Росгидромет, 2021)*

**Режим увлажненности**

Степень засушливости на преобладающей части земледельческой зоны растет во все сезоны, за исключением весны (Черенкова и др., 2015). Положительная тенденция к росту весенних осадков наблюдается практически на всей территории земледельческой зоны России. Тренды летних осадков отрицательны на ЕТР – в Центральном, Приволжском и Южном ФО. Исключение составляет Северо-Западный ФО, где наблюдается тенденция к росту осадков летнего периода. На АТР, в Уральском, Сибирском и Дальневосточном ФО в целом тенденции роста уровня увлажненности территории положительны, но это не исключает того факта, что в столь обширном регионе имеются области с тенденцией к росту повторяемости засух и засушливых явлений.

Как показывают оценки, растет число дней вегетационного периода с запасами влаги в пахотном слое почвы (0-20 см) менее 10 мм, что означает увеличение риска (повторяемости) опасного явления «Засуха почвенная» на посевах сельскохозяйственных культур. Эти оценки подтверждают вывод о росте степени засушливости на территории основных сельскохозяйственных областей (Росгидромет, 2021).

Оценки линейного тренда индекса сухости (ИС), который рассчитывается как отношение испаряемости к годовой сумме осадков и характеризует влагообеспеченность агроэкосистем при естественном увлажнении за весь теплый период года, показывают, что тенденция, связанная с усилением засушливости, наблюдается на преобладающей части ЕТР и отдельных регионах АТР по данным за 1976-2020 гг. (рис. 2.3.2.2).

а) б)

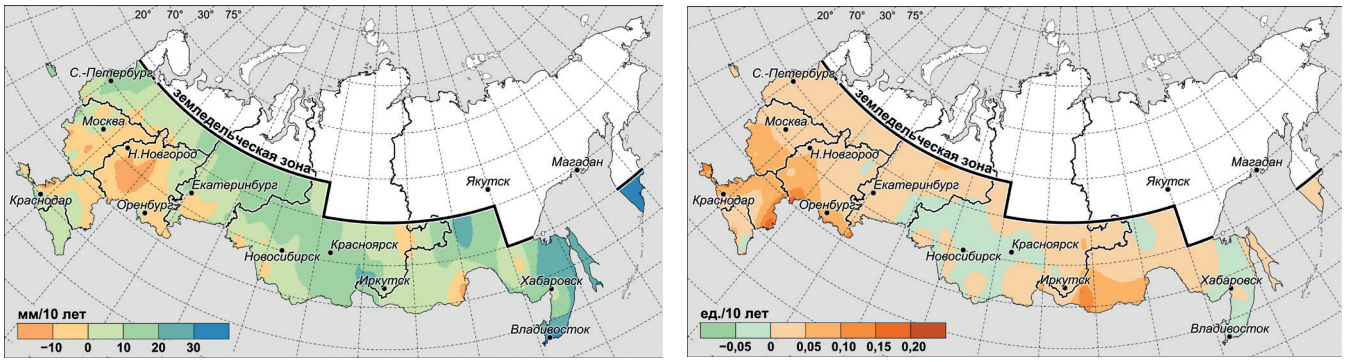



***Рис. 2.3.2.2*** *Скорость изменения (линейный тренд) показателей влагообеспеченности за период 1976-2020 гг.: а) сумма осадков за теплый период года (Т > 5 °С), мм/10 лет; б) индекс сухости Будыко, ед./10 лет (Росгидромет, 2021)*

**Повторяемость засух**

Продолжающееся потепление на территории России вызывает изменение повторяемости частоты и интенсивности экстремальных явлений погоды, таких как засухи, суховеи, волны тепла, длительные периоды без дождей. Практическая значимость проблемы очевидна: ущерб от таких опасных природных явлений может быть существенно выше, чем от постепенного глобального потепления (Росгидромет, 2014; Золотокрылин и др., 2014; Фролов, Страшная, 2011; Вильфанд и др., 2016).

Засухи и засушливые явления характерны для южных и юго-восточных регионов России, например Поволжья, где возделывается основная продовольственная культура – пшеница. При нарастании частоты и интенсивности засух агроклиматические условия территорий, на которых выращиваются зерновые культуры, могут стать непригодными для этого вида землепользования.

Засуха, как опасное природное явление, в соответствии с определением, принятым в системе Росгидромета (РД, 2008), имеет следующую формулировку: «В период вегетации сельскохозяйственных культур отсутствие эффективных осадков (более 5 мм в сутки) за период не менее 30 дней подряд при максимальной температуре воздуха выше 25 °С (в южных районах Российской Федерации – выше 30 °С). В отдельные дни (не более 25% продолжительности периода) возможно наличие максимальных температур ниже указанных пределов».

Оценка повторяемости засух в соответствии с этим определением выполнена для территории центральных и южных областей ЕТР за период с 1984 по 2018 г. (табл. 2.3.2.3, рис. 2.3.2.3). Повторяемость засух (доля лет с опасным явлением «Засуха атмосферная»,%) варьирует значительно – от ~10% (один случай за 10 лет) на севере и северо-западе региона до ~70% в Оренбургской и Астраханской областях и Республике Калмыкия. Самые длительные и интенсивные засухи были зафиксированы в 2010, 2014 и 2018 гг., когда их продолжительность достигала четырех месяцев, например в Оренбурге в 2014 г. (111 сут.) (Национальный доклад, 2021).

***Таблица 2.3.2.3*** *Характеристики опасного явления «Засуха атмосферная» по отдельным реперным точкам наблюдений на ЕТР, рассчитанные за период 1984-2018 гг. (35 лет)*

| Метеостанция, субъект Российской Федерации: республика, край, область | Повторяемость, % | Число засух, ед. | Продолжительность, сут. | |
|---|---|---|---|---|
| | | | средняя | максимальная (год) |
| Рязань, Рязанская | 12 | 4 | 46 | 65 (2010) |
| Елец, Липецкая | 14 | 5 | 41 | 63 (2018) |
| Воронеж, Воронежская | 31 | 11 | 37 | 51 (2014) |
| Гигант, Ростовская | 31 | 11 | 40 | 63 (2014) |
| Октябрьский городок, Саратовская | 49 | 17 | 50 | 81 (2014) |
| Оренбург, Оренбургская | 69 | 24 | 50 | 111 (2014) |
| Краснодар, Краснодарский | 37 | 13 | 43 | 73 (2018) |
| Ливны, Орловская | 17 | 6 | 39 | 54 (2018) |
| Астрахань, Астраханская | 66 | 23 | 52 | 102 (2010) |
| Городовиковск, Калмыкия | 31 | 11 | 41 | 62 (2014) |
| Яшкуль, Калмыкия | 71 | 25 | 45 | 104 (2010) |

На негативную тенденцию, связанную с ростом частоты сильных засух, указывают результаты, полученные с помощью метода оценки благоприятности климата для выращивания зерновых культур с использованием данных мониторинга климата о засушливости (Росгидромет, 2021; Павлова и др., 2020а; Богданович и др., 2021). В качестве критерия сильной засухи принималось значение ГТК Селянинова меньше 0,6, рассчитанное за период с мая по август.

Климат какого-либо периода времени (ряда последовательных лет) считается неблагоприятным для возделывания зерновых культур, если частота сильных засух p для него (параметр распределения Бернулли) превышает 0,5 (Правила отнесения территорий, 2015). Этот параметр оценивался по данным наблюдений метеостанций для двух периодов времени – 1976-1997 и 1998-2019 гг. В самых неблагоприятных условиях оказались станции, расположенные в Астраханской, Волгоградской, Саратовской и Оренбургской областях, Республиках Калмыкия и Крым. При этом в Волгоградской и Саратовской областях обнаружено заметное возрастание вероятности сильных засух в 1998-2019 гг. по сравнению с 1976-1997 гг.

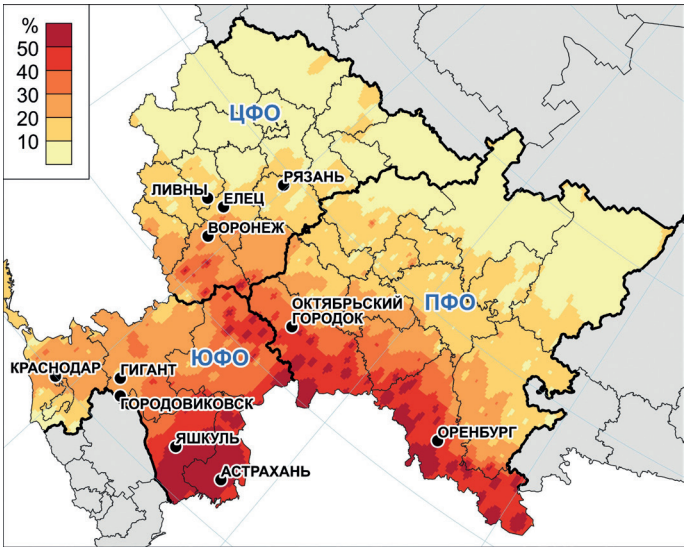



***Рис. 2.3.2.3*** *Повторяемость (доля лет с событием,%) засух на территории Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов за период 1984-2018 гг.*

Наблюдаемые тенденции к усилению засушливости, вероятно, приведут к росту уязвимости территорий и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в земледельческой зоне России. Высокие риски получения низких урожаев яровой пшеницы при засухах характерны для Южного (37,9%) и Приволжского (23,0%) ФО; озимой пшеницы – для Приволжского (18,0%) и Южного (12,1%) ФО (рис. 2.3.2.4) (Павлова, Варчева, 2017; Романенков и др., 2018).

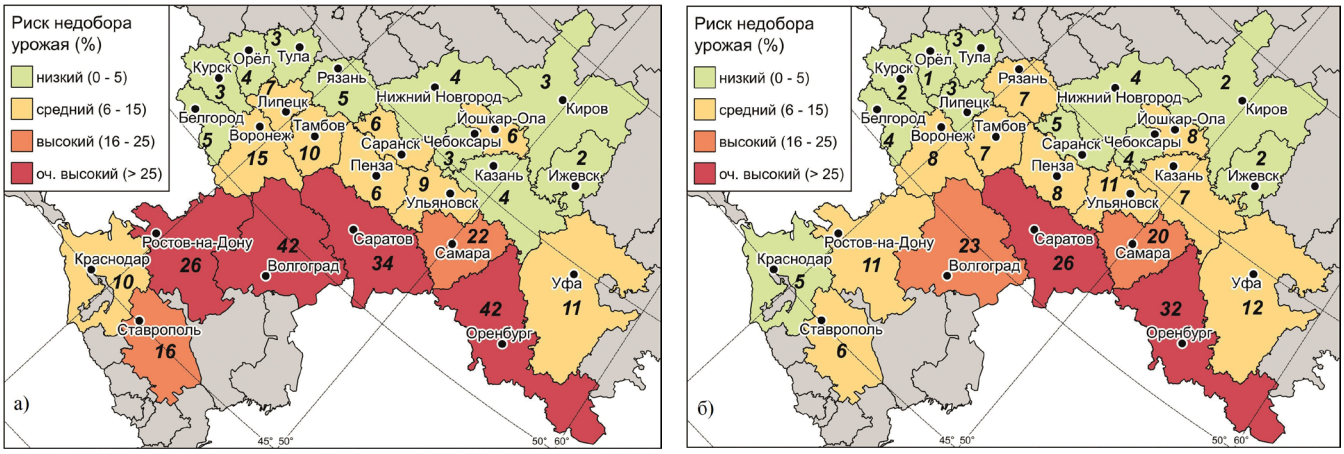



***Рис. 2.3.2.4*** *Карта распределения рисков недобора урожая: а) яровой пшеницы, б) озимой пшеницы. Расчеты выполнены по данным за 1994-2013 гг.*

Средние по России риски недобора урожая яровой и озимой пшеницы, рассчитанные с учетом посевных площадей, отличаются незначительно и составляют 12,5 и 10,6% соответственно. Сравнительно небольшие риски недобора урожаев зерновых (в два раза ниже средних по стране) отмечаются в Сибирском и Центральном ФО (3,1-6,4%). Положительный фактор – низкие риски неурожаев яровой пшеницы в Сибирском ФО, где ее площади занимают почти половину ярового клина страны, а также озимой пшеницы в Центральном ФО (около 25% всех посевных площадей).

В то же время применение эффективных обоснованных стратегий в земледелии может снизить риски недобора урожайности, связанные с погодно-климатической составляющей. Исследования показывают, что применение средних доз минеральных удобрений снижает климатические риски при возделывании зерновых культур (Романенков и др., 2018). Этот вывод основан на анализе данных длительных полевых опытов с удобрениями Геосети. Климатические риски оказались в 23 случаях ниже соответствующих среднеобластных значений, рассчитанных за один и тот же период. Для большинства случаев обеспечивалось снижение риска на одну, а для озимых культур – на две градации за счет лучшей реализации культурами биоклиматического потенциала. Оптимизация минерального питания при применении средних доз удобрений, проявлявшаяся в снижении рисков, была наиболее выражена на посевах яровой пшеницы.

**Изменение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы**

Оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы при изменении агроклиматических ресурсов (с 1976 г.) получены в результате ретроспективного анализа рядов климатически обеспеченной урожайности по отдельным десятилетиям 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005, 2006-2015 гг. для территории земледельческой зоны.

Климатически обусловленная урожайность при зафиксированном современном уровне технологии земледелия или агротехники зависит только от гидрометеорологических факторов и естественного плодородия почвы, что позволяет исключить технологические тренды и оценить изменение только климатической составляющей урожайности при наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата. Расчеты климатически обусловленной урожайности выполняются с помощью системы «Климат – Почва – Урожай».

Потепление последних десятилетий не вполне однородно по его воздействию на агроклиматические ресурсы и на продуктивность сельскохозяйственных культур в земледельческой зоне России. Реакция на изменение режима тепло- и влагообеспеченности последних десятилетий зависит и от культуры, и от широты зоны ее произрастания (южные или северные территории). Есть регионы и культуры «выигравшие» и «проигравшие».

В южных и юго-восточных регионах ЕТР (Южный ФО, центрально-черноземные области, юго-восточные области Приволжского ФО) наблюдаемые тенденции изменений агроклиматических ресурсов привели к снижению климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в период с 2006 по 2015 г. на 20-25% относительно базового периода 1961-1990 гг. (рис. 2.3.2.5, табл. 2.3.2.4) (Павлова, Караченкова, 2020).

Одним из основных факторов, приводящим к снижению продуктивности в этом регионе, является повышение температуры вегетационного периода зерновых культур. По оценкам, средняя температура вегетационного периода повысилась на 1,0-1,5 °С, что вызвало сокращение его продолжительности (в среднем на 4-6 суток относительно десятилетия 1976-1985 гг.) и сокращение межфазных периодов, ускоренное созревание и снижение продуктивности вследствие этого.

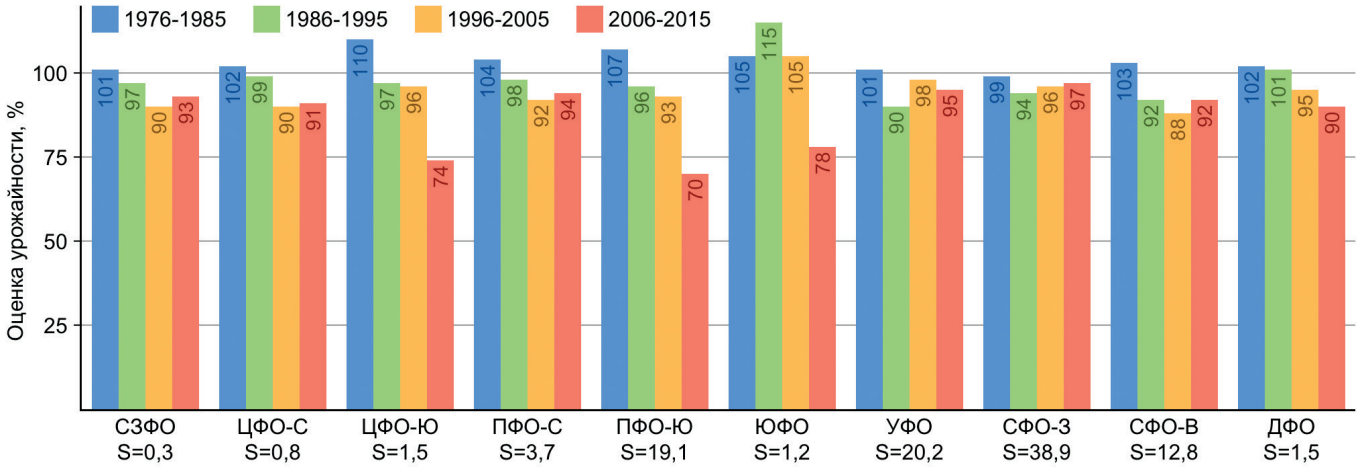



***Рис. 2.3.2.5*** *Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по десятилетиям относительно базового периода 1961-1990 гг. по крупным зернопроизводящим регионам России*

*Обозначения: С – север, Ю – юг, В – восток, З – запад; S – доля посевной площади от общей по Российской Федерации за 1996-2015 гг.,%*

На фоне повышения температуры показатели влагообеспеченности также претерпели существенные изменения. На территории ЕТР, за исключением самых северных районов, количество осадков за вегетационный период яровых зерновых культур в среднем за последнее десятилетие не превышает 200-250 мм, что ниже их физиологической потребности во влаге. Результатом наблюдаемых изменений агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровых зерновых культур на территории центрально-черноземных и южных областей ЕТР за последнее десятилетие.

В сельскохозяйственных районах Восточной Сибири и на Дальнем Востоке изменения показателей агроклиматических ресурсов за период потепления менее значительные, чем на ЕТР. Температура вегетационного периода в среднем за последнее десятилетие повысилась на 0,6-0,8 °С относительно базового периода. Режим осадков также не претерпел существенных изменений. На этом фоне оценки изменений средней по десятилетиям климатически обусловленной урожайности в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке не превышают 10%, т.е. находятся в пределах ее естественной изменчивости (рис. 2.3.2.5).

В Западной Сибири и на Урале колебания урожайности по десятилетиям с 1976 по 2015 г. в среднем по территории не превышают 5%. Значимое понижение урожайности, связанное с долговременными изменениями температурного и влажностного режимов, отмечается лишь в некоторых районах Новосибирской, Челябинской областей и в Алтайском крае.

Представленные оценки позволяют сделать вывод, что сельскохозяйственные районы ЕТР, и особенно ее южные области, более чувствительны к современному потеплению, чем районы Урала, Сибири и Дальнего Востока. Климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы за 2006-2015 гг. на ЕТР составляет 75-80% от уровня 1961-1990 гг., в то время как на АТР – ~95% (табл. 2.3.2.4).

В среднем климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы понизилась на ~12% с 1976 по 2015 г., т.е. оценка тенденции ее понижения составляет ~ 3% за десятилетие.

***Таблица 2.3.2.4***

*Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по десятилетиям относительно базового периода 1961-1990 гг.*

| Регион | S, % | Оценка урожайности, % | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1976–1985 | 1986–1995 | 1996–2005 | 2006–2015 |
| ЕТР | 26,6 | 106 | 97 | 93 | 75 |
| АТР | 73,4 | 100 | 93 | 95 | 95 |
| Россия в целом | 100,0 | 102 | 94 | 95 | 90 |

*Примечание*: S – доля посевной площади в регионе от общей по Российской Федерации за 1996-2015 гг.

Если ожидаемые темпы потепления сохранятся, как прогнозирует большинство климатических моделей, отсутствие роста климатически обусловленной урожайности зерновых культур, вызванное аридизацией и напряженностью термического режима вегетационного периода зерновых культур, станет устойчивой тенденцией в земледельческой зоне России.

Отрицательные тренды климатически обусловленной урожайности, выявленные на территории южных регионов России, пока не столь драматичны, но могут стать таковыми, если не будут приняты адаптационные меры, противодействующие последствиям наблюдаемых изменений климата.

### 2.3.2.2 Сельскохозяйственные вредители

В последние годы продолжают появляться свидетельства об освоении вредными насекомыми новых районов на территории Российской Федерации, что является следствием продолжающегося глобального потепления. Так, во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) были выявлены регионы возможного заселения колорадским жуком в Российской Федерации при изменении климата по сценариям IPCC из проекта сравнения моделей CMIP5. Одним из уязвимых районов был назван юг о. Сахалин, где на тот момент еще не был обнаружен этот вредитель картофеля. Однако в 2015 году появилось сообщение о заселении колорадским жуком и этой территории (Коваленко, Мацишина, 2015).

Авторами (Перевертин и др., 2020) с помощью построения оценочной математической модели онтогенеза томатной минирующей моли *Tuta*, завезенной из Южной Америки вначале в Европу (Испания), а с 2009 г. выявленной в Российской Федерации (Ижевский и др., 2011), показана возможность укоренения этого вредителя и в Московской области в двух поколениях при наблюдаемых климатических изменениях. Усиление засушливости южных и центральных районов России приводит к учащению вспышек различных саранчовых вредителей на дан-

ной территории. Отмечено продолжение расширения ареала итальянского пруса в России в последние годы (Popova, Popov, 2019). На основе проведенных математических расчетов с использованием базы данных результатов реанализа, созданной в Отделе по изучению климата Университета Восточной Англии (Current Datasets, 2017), и дальнейшей их визуализации с помощью картосхемы показаны изменения климатического ареала итальянского пруса (*Calliptamus italicus* L.) на территории России и соседних стран в период 1996-2015 гг. относительно периода 1956-1975 гг. (рис. 2.3.2.6).

На рис. 2.3.2.6 видно, что граница климатического ареала *C. italicus* L. смещается преимущественно в северном и восточном направлениях в период 1996-2015 гг. относительно периода 1956-1975 гг. Эти изменения связаны, в первую очередь, с увеличением суммы эффективных температур в последние десятилетия на большей части территории России (Popova et al., 2018). Подобное смещение ареала итальянского пруса было зафиксировано ранее для периода 1991-2010 гг. при использовании только российской базы данных наземных измерений (Попова, 2014). Таким образом, подтверждено, что в настоящее время тенденция расширения климатического ареала итальянского пруса не исчезает, несмотря на то что в последние несколько лет (после 2012 г.) наблюдается постепенное снижение его активности и вытеснение его с юга более агрессивной марокканской саранчой (*Dociostaurus maroccanus* Thunb.) (Обзор, 2018, 2019, 2020; Стамо и др., 2017; Popova, Popov, 2019).

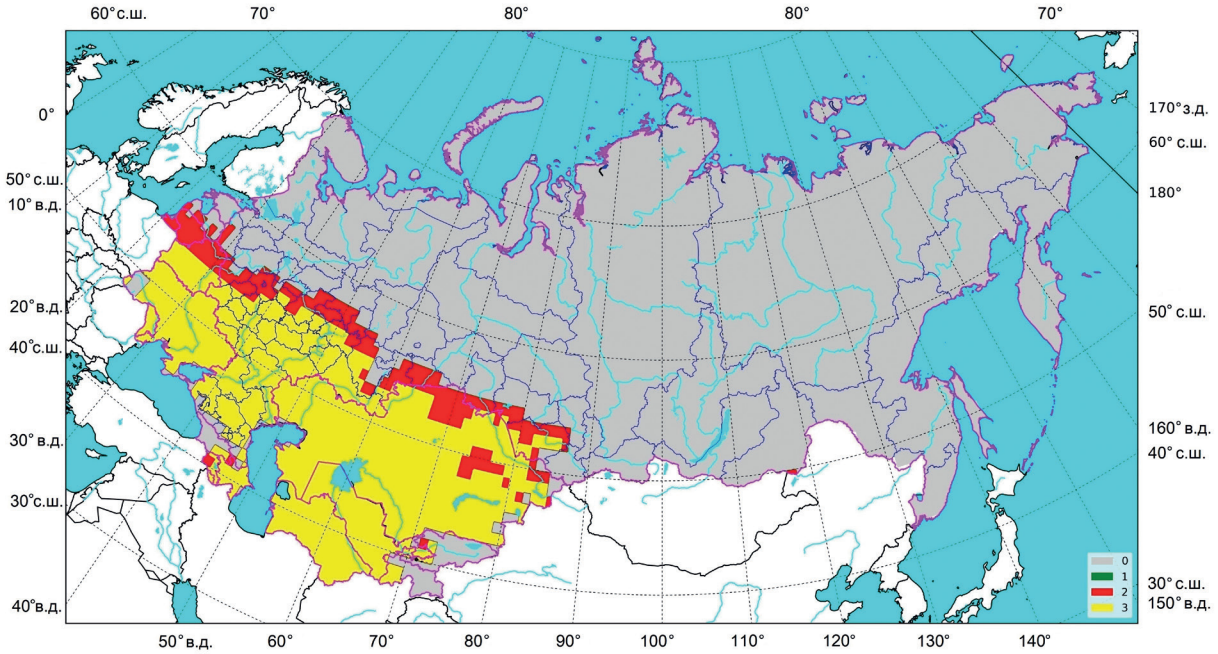



***Рис. 2.3.2.6*** *Изменение климатического ареала итальянского пруса на территории России и соседних стран в период 1996-2015 гг. относительно периода 1956-1975 гг.:*

*0 – территория вне ареала в оба периода; 1 – территория сокращения ареала; 2 – территория приращения климатического ареала в период 1996-2015 гг.; 3 – климатический ареал в оба периода (Popova, Popov, 2019)*

В последние годы также наблюдается усиление вредоносности нестадных саранчовых в Сибири и на Дальнем Востоке, которые наносят значительный ущерб растениеводству. Наиболее опасны для сельского хозяйства: кобылка сибирская (*Aeropus sibiricus* L.), кобылка крестовая (*Pararcyptera microptera*), конек сибирский (*Chorthippus hammarstroemi* Mir.), конек дальневосточный (*Chorthippus schmidti* Ikonn) (Республики Саха (Якутия), Тыва, Хакасия, Амурская и Иркутская области) (Попова, 2017; Обзор, 2018, 2019, 2020). В связи с этим мониторинг популяций наиболее опасных для России видов саранчовых остается актуальнейшей проблемой для сельского хозяйства. Выявленное продолжающееся расширение климатического ареала итальянского пруса свидетельствует о том, что угроза его нашествий не исчезла и в любой момент (при наступлении благоприятных погодных условий в отдельные годы) может проявиться с новой силой.

### 2.3.2.3 Ожидаемые изменения продуктивности зерновых культур в XXI веке

В специальном докладе МГЭИК (IPCC, 2019) утверждается, что в будущем изменение климата продолжит постоянно и негативно влиять на растениеводство в странах, расположенных в низких широтах, в то время как изменение климата может иметь как положительные, так и отрицательные последствия в северных широтах. Глобальные прогнозные оценки продуктивности разнятся значительно: около 10% прогнозов на период 2030-2049 гг. указывают на прирост урожайности более чем на 10%, и около 10% – на потери урожайности более чем на 25% по сравнению с концом XX века.

В общем случае неопределенность оценок будущих изменений урожайности обусловлена несколькими причинами: во-первых, различиями между принятыми МГЭИК сценариями будущего радиационного воздействия на глобальную климатическую систему (van Vuuren et al., 2011); во-вторых, различиями уровня сложности и пространственного разрешения как моделей общей циркуляции атмосферы и океана, так и моделей продуктивности агроэкосистем (Asseng et al., 2013).

Чтобы минимизировать еще один источник неопределенности – естественную климатическую изменчивость, целесообразно использовать большие модельные климатические ансамбли. Размер ансамбля и высокая пространственная детализация расчетов на базе высокоразрешающих модельных систем играют ключевую роль в оценках будущих изменений в статистике экстремальных погодно-климатических явлений (Kendon et al., 2008). Современные региональные модели по сравнению с глобальными имеют более высокое горизонтальное разрешение (~10 км), что обеспечивает более реалистичное описание мезомасштабной компоненты изменчивости (Rummukainen et al., 2015).

К таким моделям относится региональная климатическая модель ГГО (Школьник, Ефимов, 2015; Shkolnik et al., 2018; Катцов и др., 2016). Размер ансамбля реализаций (n=1500) региональной климатической модели позволяет получить вероятностные оценки изменений показателей гидротермического режима региона с высокой степенью статистической обеспеченности и оценить множество возможных вариаций климата, включая экстремальные. Совместное использование региональной климатической модели и имитационной системы «Климат – Почва – Уро-

жай» обеспечивает достоверные прогнозные оценки будущей урожайности.

В близкой перспективе (2030-2039 гг.) можно ожидать снижения урожайности на территории Центрального ФО (черноземная зона) на –11,7±3,0%, величина которого к середине века может достигнуть –15,8±5,1% относительно базового периода. К концу столетия урожайность зерновых может сократиться на треть при прогнозируемых изменениях климата и при отсутствии адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности теплом и влагой посевов сельскохозяйственных культур (табл. 2.3.2.5) (Pavlova et al., 2019; Катцов и др., 2019).

***Таблица 2.3.2.5***

*Средние оценки изменения (из 50 реализаций) урожайности яровой пшеницы в разные периоды XXI века и соответствующий 95%-й доверительный интервал (ΔY,%) на территориях Центрального (ЦФО), Приволжского (ПФО) и Южного (ЮФО) федеральных округов. Расчеты выполнены в имитационной системе «Климат – Почва – Урожай» по результатам региональной климатической модели ГГО (сценарий эмиссии RCP8.5)*

| Федеральный округ | Среднее по ансамблю изменение[1]), % | | |
|---|---|---|---|
| | 2030–2039 гг. | 2050–2059 гг. | 2090–2099 гг. |
| ЦФО[2]) | –11,7±3,0 | –15,8±5,1 | –32,9±3,4 |
| ПФО | –5,7±2,4 | –6,7±3,0 | –21,5±3,1 |
| ЮФО | –9,9±2,3 | –8,2±3,0 | –2,6±0,4 |
| ЦФО+ПФО+ЮФО | –9,1±2,3 | –10,3±3,2 | –18,9±2,8 |

Пояснение: [1]) Расчеты выполнены с учетом изменения уровня концентрации $CO_2$ в атмосфере согласно оценкам, приведенным в (Clarke et al., 2009);

[2]) Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области

Средние по ансамблю оценки изменения урожайности яровой пшеницы в 95%-ном доверительном интервале показывают, что в Приволжском ФО до середины текущего столетия не следует ожидать роста климатически обусловленной урожайности. Снижение продуктивности яровой пшеницы составит –6,7±3,0% к 2050-2059 гг. Можно ожидать, что умеренный рост засушливости климата в ближайшие два-три десятилетия на этой территории не окажет существенного влияния на зерновой сектор региона.

Снижение урожайности яровой пшеницы в Южном ФО может достигнуть величины –9,9±2,3% уже в 2030-2039 гг. К концу столетия ожидаемое изменение агрометеорологических условий вегетационного периода, сопровождаемое ростом количества осадков на 11% и повышением температуры воздуха в диапазоне 0,4-0,8 °С, приведет к незначительному снижению урожайности – на 2,6±0,4%.

Оценки будущих изменений факторов урожайности в основных зернопроизводящих районах ЕТР указывают на усиление в XXI веке неблагоприятных погодно-климатических условий для выращивания зерновых. Главная причина этого – ожидаемый рост аридности климата на фоне роста температуры и прогнозируемого усиления дефицита влаги из-за тенденции либо к уменьшению, либо к слабому изменению осадков. К середине XXI века потепление на ЕТР может привести к снижению продуктивности зерновых культур на –10,3±3,2% по сравнению с базовым периодом. В тот же период самые большие потери продуктивности могут составить 15,8±5,1% в центрально-черноземных областях, наименьшие (–6,7±3,0%) – в Приволжском ФО. К концу XXI века урожайность зерновых здесь может сократиться на треть в отсутствие адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности растений влагой и снижением ее запасов в почве.

**Адаптация сельскохозяйственного производства к ожидаемым изменениям климата**

Для получения реалистичных оценок влияния ожидаемых изменений климата нельзя не учитывать возможность приспособления (адаптации) сельского хозяйства к изменяющимся условиям среды, хотя эта природно-экономическая система отличается высокой консервативностью.

За период потепления (с 1976 г.) климат существенно изменился, но сельское хозяйство России до сих пор не имеет достаточно обоснованной стратегии реагирования на эти изменения и несет вполне устранимые при наличии адаптации потери. Для преодоления негативных последствий изменения климата и достижения конкурентных преимуществ в аграрном секторе экономики России необходима эффективная стратегия адаптации. Россия нуждается в ней в большей степени, чем другие страны – крупные производители продовольствия. Для этого есть, по крайней мере, три причины. Первая причина – рекордно быстрые как наблюдаемые, так и прогнозируемые изменения климата; вторая – исключительно сильная зависимость сельского хозяйства от изменений и колебаний климата, и третья – наличие огромного потенциала адаптации.

Современное сельское хозяйство использует разнообразные способы адаптации к изменению климата. Эффективная адаптация предполагает сочетание различных систем земледелия, развитые ирригационные технологии, сохранение высокого уровня плодородия почв, использование высокопродуктивных, стресс-толерантных сортов сельскохозяйственных культур и новых сельскохозяйственных технологий и гибкую систему принятия решений. При этом стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства должна быть «встроена» в естественные процессы саморегуляции биосферы.

Последствия отдельных перечисленных стратегий адаптации могут быть выражены в форме количественных оценок интегральных показателей продуктивности.

С помощью системы «Климат – Почва – Урожай» оценены приращения климатически обусловленной урожайности при разных мерах адаптации, включающих достаточный уровень увлажненности ($\Delta Y_W$) и достаточный уровень минерального питания ($\Delta Y_N$). Расчеты выполнены на примере яровой пшеницы по ансамблю результатов региональной модели ГГО для трех вариантов прогнозируемых

условий – среднем из 50 реализаций, влажном и сухом на 2050-2059 гг., и представлены в табл. 2.3.2.6 (Катцов и др., 2019).

При достаточном увлажнении почвы приращение урожайности яровой пшеницы к 2050-2059 гг. в засушливых регионах составит: в Южном ФО – 8-16 ц/га, на юге Приволжского ФО – 7-11 ц/га. В нечерноземной зоне на менее плодородных почвах (север Приволжского ФО) урожайность может увеличиться на 11-18 ц/га за счет достаточного минерального питания (табл. 2.3.2.6). При комплексной оптимизации условий увлажнения и минерального питания прирост урожайности может быть значительным и достигать величины от 21 до 28 ц/га. Диапазон оценок прироста урожайности при разных мерах адаптации к изменениям климата к концу текущего столетия незначительно отличается от приведенных выше оценок для периода 2050-2059 гг.

***Таблица 2.3.2.6***

*Количественные оценки мер адаптации к изменениям климата на 2050-2059 гг. на примере яровой пшеницы при трех вариантах прогнозируемых условий: среднем из 50 реализаций, влажном и сухом. Расчеты выполнены в имитационной системе «Климат – Почва – Урожай»*

| Федеральный округ | Приращение урожайности, ц/га | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | средний | | влажный | | сухой | |
| | $\Delta Y_W$ | $\Delta Y_N$ | $\Delta Y_W$ | $\Delta Y_N$ | $\Delta Y_W$ | $\Delta Y_N$ |
| Центральный* | 3–10 | 7–12 | 3–7 | 14–20 | 1–3 | 5–10 |
| Приволжский, север | 1–4 | 11–18 | 1–3 | 18–22 | 2–4 | 10–15 |
| Приволжский, юг | 7–11 | 5–8 | 6–10 | 6–10 | 4–6 | 5–7 |
| Южный | 8–16 | 2–6 | 8–14 | 2–6 | 3–8 | 1–4 |

* Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Меры адаптации: $\Delta Y_W$ – достаточное увлажнение, $\Delta Y_N$ – минерализация

Основы адаптивной стратегии уменьшения негативных для земледелия последствий климатических изменений разработаны И. Б. Усковым (Усков, Усков, 2014). Для реализации этой стратегии необходима информационная база данных, систематическое описание которой в работе приводится. На основе этой базы разрабатываются агрономические и хозяйственные управленческие решения на оперативном, плановом и проектном временных уровнях. Методы и результаты прогнозных оценок ожидаемых климатических изменений представлены по территории Российской Федерации.

Предлагаемые меры адаптации включают широкое внедрение современных сельскохозяйственных практик, которые снизят зависимость агросферы от изменений климата.

В работе В. П. Якушева (Якушев, Якушев, 2018) обоснован переход на технологии точного земледелия как ключевого сегмента «Умного

сельского хозяйства». В сравнительных экспериментах показано, что новые технологии на фоне существенного роста урожайности обеспечивают повышение окупаемости удобрений и средств защиты растений в 1,5-1,7 раза, а агрохимическая нагрузка на ландшафты при этом снижается на 35-60% и заметно повышается качество продукции.

Однако реализация технологии точного земледелия сталкивается с рядом проблем, среди которых – современное состояние информационного обеспечения земледельческой отрасли (Якушев и др., 2021). Отмечается его несовершенство, которое не позволяет повсеместно обеспечить получение высоких урожаев, возможных в конкретных почвенно-климатических условиях, и воспроизводство почвенного плодородия. Перспективы совершенствования информационного обеспечения сельскохозяйственного производства тесно связаны с развитием инфраструктуры сопряженного дистанционного и наземного мониторинга и оценки состояния сельскохозяйственных земель и посевов. Разрабатываются и апробируются новые методы обработки и интерпретации спутниковой информации, созданы прототипы наземных мобильных и стационарных измерительных систем сбора данных, характеризующих состояние посевов.

### 2.3.2.4 Прогнозные оценки распространения вредителей и болезней в XXI веке

С помощью расчетов значений климатических предикторов и дальнейшего моделирования климатического ареала опасного стадного сельскохозяйственного вредителя – итальянского пруса (*Calliptamus italicus* L.), выполнены оценки возможности его проникновения в различные субъекты Российской Федерации по климатическим данным для середины и конца XXI века (2035-2054 и 2080-2099 гг.) относительно базового периода 1981-2000 гг. (Попова, Попов, 2020). Расчеты для периодов будущего сделаны с использованием среднемодельного климата для 31 модели CMIP5 при развитии «умеренного» сценария антропогенного воздействия на климатическую систему Земли RCP4.5 (Катцов, Говоркова, 2013). Для сравнения приведены сведения о распространении вредителя по наблюдаемым климатическим данным в начале XXI века (табл. 2.3.2.7).

Согласно полученным результатам, климатический ареал итальянского пруса будет существенно расширяться в более северные и северо-восточные регионы нашей страны, отдельные очаги к середине и к концу XXI века смогут появиться и в восточных, в том числе дальневосточных регионах. Наблюдаемое на начало XXI века расширение реального ареала *Calliptamus italicus* L., связанное с уже произошедшим изменением климатических условий, согласуется с произведенными модельными расчетами, и отдельные регионы России, входящие в потенциальный климатический модельный ареал итальянской саранчи, уже стали благоприятны для ее расселения. Из этого следует необходимость постоянного мониторинга состояния популяций вредителя в районах, примыкающих к северной и восточной границам его ареала.

***Таблица 2.3.2.7***

*Регионы расширения климатического ареала итальянского пруса C. italicus L. (субъекты Российской Федерации) по наблюдаемым климатическим данным к началу XXI века (в 1991-2010 гг. относительно 1951-1970 гг.) и по модельным климатическим оценкам к середине (2035-2054 гг.) и к концу XXI века (2080-2099 гг.) относительно периода 1981-2000 гг. (Попова, Попов, 2020)*

| Субъект Российской Федерации | Регионы потенциального расширения климатического ареала итальянского пруса | | |
|---|---|---|---|
| | 1991–2010 гг. | 2035–2054 гг. | 2080–2099 гг. |
| Республика Башкирия | +*) | + | + |
| Республика Бурятия | – | + | + |
| Республика Алтай | + | + | + |
| Республика Карелия | – | + | + |
| Республика Коми | – | – | + |
| Республика Марий Эл | + | + | + |
| Республика Саха (Якутия) | – | – | + |
| Республика Татарстан | +*) | + | + |
| Республика Тыва | – | + | + |
| Удмуртская республика | +*) | + | + |
| Республика Хакасия | – | + | + |
| Чувашская республика | + | + | + |
| Алтайский край | +*) | + | + |
| Красноярский край | – | + | + |
| Хабаровский край | – | + | + |
| Архангельская область | – | – | + |
| Владимирская область | + | + | + |
| Вологодская область | – | + | + |
| Ивановская область | + | + | + |
| Иркутская область | – | + | + |
| Калужская область | + | + | + |
| Кемеровская область | – | + | + |
| Кировская область | +*) | + | + |
| Костромская область | + | + | + |
| Курганская область | + | + | + |
| Ленинградская область | – | + | + |
| Московская область | + | + | + |
| Нижегородская область | + | + | + |
| Новгородская область | – | + | + |

| Субъект Российской Федерации | Регионы потенциального расширения климатического ареала итальянского пруса | | |
|---|---|---|---|
| | 1991–2010 гг. | 2035–2054 гг. | 2080–2099 гг. |
| Новосибирская область | +*) | + | + |
| Омская область | +*) | + | + |
| Оренбургская область | +*) | + | + |
| Орловская область | + | + | + |
| Пермский край | + | + | + |
| Псковская область | + | + | + |
| Рязанская область | +*) | + | + |
| Сахалинская область | – | – | + |
| Свердловская область | + | + | + |
| Смоленская область | + | + | + |
| Тверская область | + | + | + |
| Томская область | – | + | + |
| Тульская область | + | + | + |
| Тюменская область | + | + | + |
| Челябинская область | +*) | + | + |
| Забайкальский край | – | + | + |
| Ярославская область | + | + | + |
| Ханты-Мансийский АО | – | + | + |

*Примечание*. *) Субъекты Российской Федерации, где впервые было отмечено появление итальянского пруса в начале XXI века. Зеленым цветом выделены регионы, проникновение в которые итальянского пруса произойдет в середине и в конце XXI века; красным цветом – только в конце XXI века

### 2.3.2.5 Влияние изменений климатических условий на животноводство в XXI веке

В России в сельском хозяйстве животноводство является второй по значимости (после растениеводства) отраслью отечественного сельского хозяйства. Ее важность определяется тем, что наравне с растениеводством она обеспечивает продовольственную безопасность страны. Самая универсальная, продуктивная и широко развитая в России отрасль животноводства – скотоводство, дающее большой объем животноводческой продукции (40% всего производимого мяса). Эта отрасль делится на три подотрасли: мясное, молочное и комбинированное (мясо-молочное) скотоводство. Молочное скотоводство распространено повсеместно (кроме районов Крайнего Севера). Мясное скотоводство развивается там, где есть подходящие кормовая база и климатические условия. Проведение различных мероприятий в животноводстве может быть успешно осуществлено

при правильном учете агроклиматических данных. К таким данным прежде всего относятся сведения о сроках начала и окончания выпаса скота, которые используются для определения длительности стойлового содержания животных. Эти данные необходимы в животноводстве для расчета кормов на зимний период.

Животноводство, как и другие отрасли сельского хозяйства, зависит от климата и его изменений. Продолжительность пастбищного периода и стойлового содержания животных в зависимости от климата на территории России значительно изменяется. На Европейской территории России (ЕТР) весенний выпас крупного рогатого скота начинают при высоте пастбищных трав 5-10 см. Эта высота обычно достигается после накопления сумм положительных средних суточных температур воздуха (после устойчивого перехода ее через 0 °С), равных 115 °С. За время окончания выпаса принимают переход средней суточной температуры осенью через 5 °С (момент прекращения роста трав). Таким образом, продолжительность зимнего стойлового содержания скота рассчитывается от даты перехода температуры через 5 °С осенью до даты начала выпаса весной. На ЕТР в северных районах (кроме оленеводческих) пастбищный период крупного рогатого скота в среднем длится 130-160, в центральных – 160-190, в южных – 200-230 дней. Длительность стойлового содержания в этих районах, соответственно, составляет 235-205, 205-175 и 165-135 дней.

Происходящее и ожидаемое потепление климата существенно влияет на сроки выпаса и продолжительность стойлового содержания животных. Сдвиг сроков выпаса весной на более ранние, а осенью – на более поздние, вызывает увеличение продолжительности пастбищного периода и соответственно сокращение зимнего стойлового периода. Сокращение периода стойлового содержания скота дает возможность значительно экономить корма и, как следствие, сократить объем заготовок кормов на зимний период. В этих условиях важной задачей является получение количественных оценок изменения агроклиматических показателей, влияющих на животноводческий сектор сельскохозяйственной отрасли, для климатологического обоснования мер по адаптации к ожидаемым изменениям климата.

В настоящее время оценки изменений продолжительности стойлового содержания крупного рогатого скота выполнены для 10 областей, расположенных на ЕТР в Северо-Западном, Центральном, Южном и Север-Кавказском ФО. В основу анализа положена технология вероятностного сценарного прогнозирования регионального климата (Катцов и др., 2020), базирующаяся на проведении массовых ансамблевых расчетов с использованием высокоразрешающей системы моделей и реализованная для указанной территории применительно к сценарию антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5 (van Vuuren et al., 2011).

По результатам расчетов была выполнена сравнительная оценка анализируемых показателей для двух прогнозных периодов XXI века (2050-2059 гг. и 2090-2099 гг.) относительно базового периода конца XX века (1990-1999 гг.). Анализ полученных оценок показывает, что уже к середине XXI века на рассматриваемой территории ожидаются значительные изменения дат начала и окончания выпаса, которые, в свою очередь, определяют продолжительность пастбищного и стойлового периодов. Согласно медианным ансамблевым оценкам, к середине века продолжительность стойлового периода на рассматриваемой территории сократится

(соответственно, продолжительность пастбищного периода возрастет) в среднем на 15-20 дней, а к концу текущего столетия аналогичные изменения составят более месяца (35-40 дней).

Для разработки оптимальных адаптационных мероприятий все агроклиматические показатели должны быть дифференцированы и детализированы применительно к конкретной территории. Детализацию целесообразно осуществлять в пределах отдельных областей по административным районам. В качестве примера на рис. 2.3.2.7 для территории Ростовской области (Южный ФО) приведены средние по административным районам значения продолжительности стойлового содержания скота в базовый период (1990-1999 гг.) и на середину текущего столетия (2050-2059 гг.). Продолжительность стойлового содержания скота в современных условиях изменяется в пределах области более чем на три недели: от 175 дней на севере области до 150 дней на юге (рис. 2.3.2.7а). К середине XXI столетия стойловый период сократится и будет варьировать от 160 до 130 дней (рис. 2.3.2.7б), т.е. пространственная изменчивость по территории области составит целый месяц.

Ожидаемое потепление климата, приводящее к значительному росту термических ресурсов, имеет для скотоводства как положительные, так и отрицательные последствия. Увеличение продолжительности периода выпаса скота на летних пастбищах и сокращение периода стойлового содержания животных, а также возможность уменьшения потребного запаса кормов на зимний сезон, являются положительными факторами. В то же время высокий уровень летних температур и возрастающая аридизация вегетационного периода, очевидно, приведут к росту тенденции выгорания травостоя на пастбищах и сенокосах, особенно в южных районах, что негативно скажется на кормовой базе и пастбищных ресурсах.

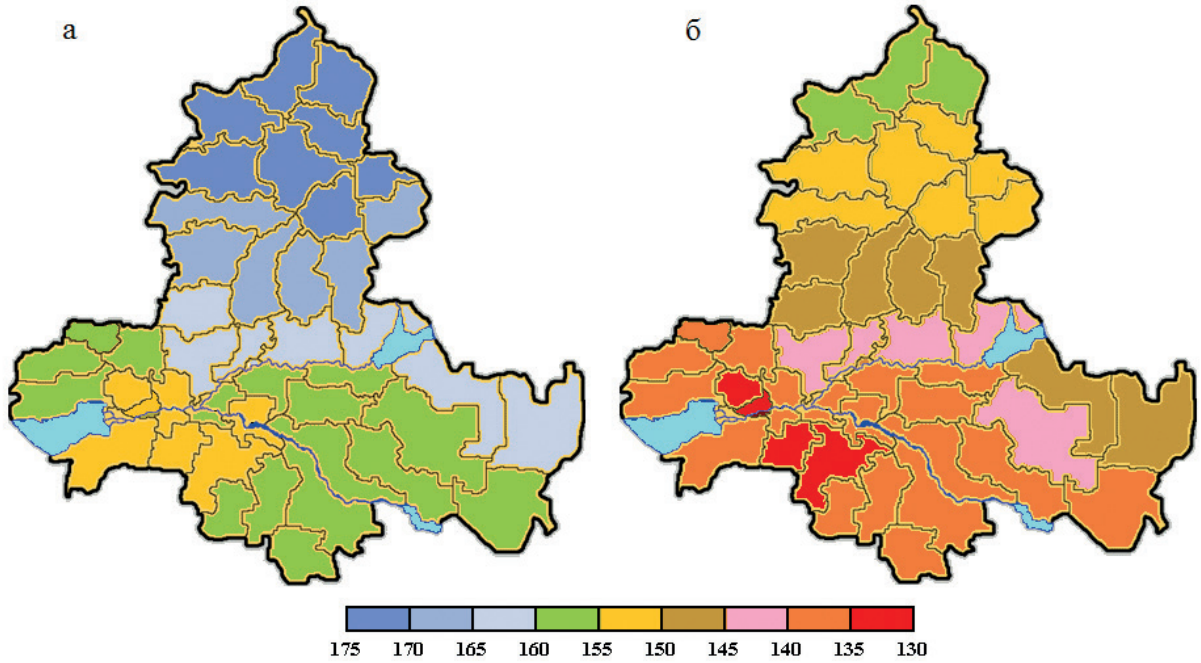



***Рис. 2.3.2.7*** *Продолжительность стойлового содержания скота (дни) в Ростовской области в 1990-1999 гг. (а) и 2050-2059 гг. (б)*

Полученные результаты позволяют сформулировать некоторые следствия из мероприятий по адаптации: сдвиг сроков начала и окончания пастбищного выпаса скота, корректировка объемов заготовки кормов на зиму, расширение сеяных выпасов для использования их в форме зеленого корма в период выгорания пастбищ.

## Список литературы


**Богданович А. Ю., Павлова В. Н., Ранькова Э. Я., Семенов С. М., 2021:** Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 7, № 1. – С. 20-35.

**Вильфанд Р. М., Страшная А. И., Береза О. В., 2016:** О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. – Вып. 360. – С. 45-78.

**Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., 2014:** Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // Аридные экосистемы. – Т. 20, № 2 (59). – С. 5-12.

**Ижевский С. С., Ахатов А. К., Синев С. Ю., 2011:** Томатная минирующая моль выявлена уже в России // Защита и карантин растений. – № 3. – С. 40-44.

**Катцов В. М., Говоркова В. А., 2013:** Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. – Вып. 569. – С. 76-98.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Хлебникова Е. И., Пикалева А. А., Байдин А. В., Борисенко В. А., 2016:** Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть I, Постановка задачи и численные эксперименты // Труды ГГО. – Вып. 583. – С. 7-29.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н., Хлебникова Е. И., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Рудакова Ю. А., Салль И. А., Байдин А. В., Задворных В. А., 2019:** Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть II, Оценки климатических воздействий // Труды ГГО. – Вып. 593. – С. 6-52.

**Коваленко Т. К., Мацишина Н. В., 2015:** Колорадский жук Leptinotarsa decemlineata и картофельная коровка Henosepilachna vigintioctomaculata (COLEOPTERA): особенности биологии и вредоносность / Сб. материалов конференции «Чтения памяти А. И. Куренцова», Вып. XXVI. – С. 128-136.

**Национальный доклад, 2019:** Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Том 2. (Р. С.-Х. Эдельгериев, ред.). – М.: ООО «Издательство МБА». – 476 с.

**Национальный доклад, 2021:** Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). Том 3. (Р. С.-Х. Эдельгериев, ред.). – М.: ООО «Издательство МБА». – 699 с.

**Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, 2019:** Электронный ресурс. URL: http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf.

**Нефедова Т. Г., 2017:** Двадцать пять лет постсоветскому сельскому хозяйству России: географические тенденции и противоречия // Известия РАН. Серия географическая. – № 5. – С. 8-19.

**Обзор, 2018:** Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2017 году и прогноз развития вредных объектов в 2018 году / Под ред. Д. Н. Говорова и А. В. Живых. – М. – 978 с.

**Обзор, 2019:** Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2018 году и прогноз развития вредных объектов в 2019 году / Под ред. Д. Н. Говорова и А. В. Живых. – М. – 900 с.

**Обзор, 2020:** Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2019 году и прогноз развития вредных объектов в 2020 году / Под ред. Д. Н. Говорова и А. В. Живых. – М. – 897 с.

**Павлова В. Н., Богданович А. Ю., Семенов С. М., 2020:** Об оценке степени благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 95-101.

**Павлова В. Н., Варчева С. Е., 2017:** Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в зерносеющих регионах России // Метеорология и гидрология. – № 8. – С. 39-49.

**Павлова В. Н., Каланка П., Караченкова А. А., 2020:** Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // Метеорология и гидрология. – № 1. – С. 78-94.

**Павлова В. Н., Караченкова А. А., 2020:** Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 4. – С. 70-91. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-XX-XX.

**Переведенцев Ю. П., Вильфанд Р. М., Шанталинский К. М., Гурьянов В. В., Николаев А. А., Исмагилов Н. В., 2018:** Мониторинг и прогнозирование климатической изменчивости на территории Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. – Вып. 371. – С. 67-94.

**Перевертин К. А., Равашдех Ш., Заец В. Г., Козлов Д. Н., Васильева Н. А., Васильев Т. А., 2020:** Роль термоадаптации в распространении томатной минирующей моли Tuta absoluta // Российский журнал биологических инвазий. – № 1. – С. 30-37.

**Попова Е. Н., 2014:** Возрастание саранчовой угрозы вслед за потеплением климата в России: расчетные оценки // Агро XXI. – № 7-9. – С. 12-15.

**Попова Е. Н., 2017:** Влияние изменений климата на распространение сельскохозяйственных вредителей в Дальневосточном регионе / Отчет о проведении 4-го форума по вопросам сотрудничества в сопредельных районах Японии и России в области сохранения экосистем (25-26 октября 2016 г., Москва, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации), с. 38-42. – Электронный ресурс: http://www.sizenken.biodic.go.jp/nichiro/houkoku161025,26.pdf.

**Попова Е. Н., Попов И. О., 2020:** Потенциальные возможности проникновения итальянского пруса в субъекты Российской Федерации в XXI веке в связи с наблюдаемыми и ожидаемыми изменениями климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. XXXI, № 1-2. – С. 34-51. http://doi.org/10.21513/0207-2564-2020-1-34-51.

**Правила отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям: постановление Правительства Российской Федерации от 27.01.2015 № 51.**

**РД 52.88.699-2008.** Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 33 с.

**Романенков В. А., Павлова В. Н., Беличенко М. В., 2018:** Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов геосети // Агрохимия. – № 1. – С. 77-86.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / (Катцов В. М., ред.). – СПб.: Росгидромет, 2017. – 105 с.

**Росгидромет, 2021:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – М.: Росгидромет. – 104 с.

**Стамо П. Д., Коваленков В. Г., Кузнецова О. В., Тюрина Н. М., Никитенко Ю. В., 2017:** Саранчовых вредителей необходимо контролировать на межрегиональном уровне // Защита и карантин растений. – № 2. – С. 6-10.

**Усков И. Б., Усков А. О., 2014:** Основы адаптации земледелия к изменениям климата (справочное издание). – СПб.: Изд-во «Нестор-История». – 384 с.

**Фролов А. В., Страшная А. И., 2011:** О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур / В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. – М.: Триада ЛТД. – С. 22-31.

**Черенкова Е. А., Бардин М. Ю., Золотокрылин А. Н., 2015:** Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью на европейской территории России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 23-35.

**Шашко Д. И., 1967:** Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Колос. – 334 с.

**Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015:** Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – Вып. 576. – С. 201-211.

**Якушев В. П., Якушев В. В., 2018:** Перспективы «Умного сельского хозяйства» в России // Вестник РАН. – Т. 88, № 9. – С. 773-784.

**Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Матвеенко Д. А., 2021:** Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. – Т. 91, № 8. – С. 55-68.

**Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A., 2007:** A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia // Global Environmental Change, v. 17, pp. 429-444.

**Asseng S., Ewert F., Rosenzweig C., Jones J. W., Hatfield J. L., Ruane A. C., Boote K. J., Thorburn P. J., Rotter R. P., Cammarano D., Brisson N., Basso B., Martre P., Aggarwal P. K., Angulo C., Bertuzzi P., Biernath C., Challinor A. J., Doltra J., Gayler S., Goldberg R., Grant R., Heng L., Hooker J., Hunt L. A., Ingwersen J., Izaurralde R. C., Kersebaum K. C., Mueller C., Kumar S. N., Nendel C., O'Leary G., Olesen J. E., Osborne T. M., Palosuo T., Priesack E., Ripoche D., Semenov M. A., Shcherbak I., Steduto P., Stoeckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F., Travasso M., Waha K., Wallach D., White J. W., Williams J. R., Wolf J., 2013:** Uncertainty in simulating wheat yields under climate change // Nature Climate Change, v. 3, pp. 827-832. DOI: 10.1038/nclimate1916.

**Clarke L., Edmonds J., Krey V., Richels R., Rose S., Tavoni M., 2009:** International climate policy architectures: overview of the EMF 22 international scenarios // Energy Economics, v. 31, pp. S64–S81.

**Current Datasets and Static Climatologies.** CRU TS v. 4.01. https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg.

**FAO, 2017:** Faostat FAOSTAT Data. Food and Agric. Org. United Nations, Rome, 2016. http://www.fao.org/faostat.

**IPCC, 2019:** Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers, 41 p. – URL: https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/.

**Kendon E. J., Rowell D. P., Jones R. G., Buonomo E., 2008:** Robustness of future changes in local precipitation extremes // Journal of Climate, v. 21, pp. 4280-4297. DOI:10.1175/2008JCLI2082.1.

**Liefert W., 2002:** Comparative Advantage in Russian agriculture // American Journal of Agricultural Economics, v. 84, pp. 762-767.

**Lobell D. B., Schlenker W., Roberts J. C., 2011:** Climate trends and global crop production since 1980. Sciencexpress, /www.sciencexpress.org/5 May 2011/.

**Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V., 2019:** Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // Environmental Research Letters, v. 14, issue 3.

**Popova E. N., Popov I. O., Semenov S. M., 2018:** Assessment of Variations in the Annual Sum of Active Temperatures and Total Precipitation during the Vegetation Period in Russia and Neighboring Countries // Russian Meteorology and Hydrology, v. 43, № 6, pp. 412-417. http://doi.org/10.3103/S1068373918060092.

**Popova E. N., Popov I. O., 2019:** Climatic Reasons for the Current Expansion of the Range of the Italian Locust in Russia and Neighboring Countries // Doklady Earth Sciences, v. 488, № 2, pp. 1256-1258. http://doi.org/10.1134/S1028334X19100246.

**Rummukainen M., Rockel B., Barring L., Christensen J. H., Reckermann M., 2015:** Twenty-first-century challenges in regional climate modeling // Bulletin of the American Meteorological Society, v. 96(8), pp. 135-138.

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, v. 50, No. 1-2, pp. 215-230. DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6.

**USDA-FAS. Grain: World Markets and Trade, 2016:** United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, http://www.fas.usda.gov.

**van Vuuren D. P., Edmonds J. A., Kainuma M., Riahi K., Thomson A. M., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakićenović N., Smith S. J., Rose S., 2011:** The representative concentration pathways: an overview // Climate Change, v. 109, pp. 5-31. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z.

## 2.3.3 Водное хозяйство

*С. А. Журавлев, В. Ю. Георгиевский, Ж. А. Балонишникова, С. И. Шамин*

Водохозяйственный комплекс России объединяет отрасли экономики, использующие водные ресурсы страны, включая коммунальное хозяйство, промышленность, энергетику, сельское и рыбное хозяйство, водный транспорт, рекреационный комплекс. Основным природным фактором, определяющим развитие водохозяйственного комплекса России, является обеспеченность водными ресурсами надлежащего объема и качества.

Российская Федерация принадлежит к числу государств, наиболее обеспеченных водными ресурсами. Среднемноголетние возобновляемые водные ресурсы России составляют более 10% мирового речного стока (2-е место в мире после Бразилии) и оцениваются в 4,3 тыс. км$^3$ в год (Водная стратегия, 2009). В целом по стране обеспеченность водными ресурсами составляет 30,2 тыс. м$^3$ на человека в год.

Водные ресурсы Российской Федерации характеризуются значительной неравномерностью распределения по территории страны. На освоенные районы европейской части страны, где сосредоточено более 70% населения и производственного потенциала, приходится не более 10% водных ресурсов.

Водохозяйственный комплекс России, являясь одним из крупнейших в мире, включает более 30 тыс. водохранилищ общим объемом свыше 800 км$^3$ и полезным объемом 342 км$^3$. Сеть каналов межбассейнового и внутрибассейнового перераспределения стока, водохозяйственных систем воднотранспортного назначения общей протяженностью более 3 тыс. км позволяет осуществлять переброску стока в объеме до 17 км$^3$ в год.

Общий объем забора (изъятия) пресной воды из природных водных объектов в Российской Федерации составляет около 65 км$^3$ в год. Свыше 90% общего объема использования водных ресурсов приходится на тепловую и атомную энергетику (37%), агропромышленный комплекс (24%), а также жилищно-коммунальное хозяйство (18%), добывающую и обрабатывающую промышленность (12%).

На территории страны затоплению подвержены отдельные территории 746 городов, тысячи населенных пунктов с населением около 4,6 млн человек, общая площадь паводкоопасных районов достигает 400 тыс. км$^2$. Для обеспечения безопасности поселений, объектов экономики и сельскохозяйственных угодий от негативного воздействия вод возведено свыше 10 тыс. км дамб и других объектов инженерной защиты.

### Климатические риски для водохозяйственного комплекса России

Развитие водохозяйственного комплекса России должно обеспечивать решение целого ряда социально-экономических и природно-ресурсных задач, основными из которых являются (Водная стратегия, 2009):

- гарантированное обеспечение водными ресурсами населения и отраслей экономики;
- охрана и восстановление водных объектов;
- обеспечение защищенности от негативного воздействия вод.

Решение указанных проблем лежит в первую очередь в области реализации технических и социально-экономических мероприятий. Однако климатические изменения являются фактором, влияющим на долгосрочную эффек-

тивность этих решений как через непосредственное воздействие на гидрологический режим водных объектов, так и косвенно.

Прямое воздействие климатических изменений на водохозяйственный комплекс определяется изменениями компонентов гидрологического цикла. Риски в водном хозяйстве, вызванные изменениями климата, связаны прежде всего с изменениями речного стока – его снижением или увеличением в том или ином регионе. Снижение стока отражается непосредственно на объемах использования воды в различных отраслях экономики и водообеспеченности населения в регионах с дефицитом водных ресурсов. Увеличение речного стока ведет к росту вероятности опасных гидрологических явлений и, следовательно, к увеличению экономического ущерба.

К косвенным воздействиям может быть отнесена, например, миграция населения в регионы с благоприятным климатом и сложной водохозяйственной обстановкой (Краснодарский край, Республика Крым) с соответствующими изменениями водообеспеченности и антропогенной нагрузки на водные объекты. Ожидаемые изменения в структуре сельского хозяйства, вследствие новых возможностей обработки ранее неосвоенных земель нечерноземной зоны и Европейского Севера, также будут способствовать появлению новых задач не только в агропромышленном, но и в водохозяйственном комплексе.

**Обеспечение водными ресурсами населения и отраслей экономики. Дефицит водных ресурсов**

Крайне неравномерное межгодовое и внутригодовое распределение стока рек является потенциальной причиной недостаточного обеспечения водой потребностей населения и экономики во многих регионах страны в маловодные годы и сезоны. Для решения этой задачи в России созданы крупнейшие каскады водохранилищ на реках Волга, Кама, Енисей, Ангара, Колыма, а также одиночные водохранилища, позволяющие перераспределять сток не только в течение года, но и в течение многолетнего периода (Цимлянское водохранилище на р. Дон, Ириклинское – на р. Урал и др.).

Параметры притока речных вод в водохранилище являются основными факторами, в зависимости от которых устанавливаются основные характеристики водохранилищ на стадии проектирования и разрабатываются правила использования их водных ресурсов. В условиях продолжающегося потепления климата произошли существенные изменения во внутригодовом распределении притока речных вод в водохранилища, имеющие региональные особенности (Фролов, Георгиевский, 2018; Научно-прикладной справочник, 2021; Основные гидрологические характеристики, 2020).

Для Волжско-Камского каскада водохранилищ характерным является увеличение в последние десятилетия притока в зимний и летне-осенний сезоны, а также его уменьшение весной (рис. 2.3.3.1). По отношению к базовому периоду (1946-1977 гг.) приток к каскаду в холодный период года в 1978-2018 гг. увеличился на 54, в теплый – на 21%, а сток весеннего половодья за апрель – май несколько снизился (на 6%). При этом значительно увеличилась его изменчивость в меженные сезоны. Среднее квадратическое отклонение в зимний период возросло на 42, а в летне-осенний – на 39%. Значительное увеличение притока в меженные месяцы, даже при его снижении в весенние месяцы, обусловило увеличение годового притока к водохранилищам каскада на 11% в среднем за период 1978-2018 гг.

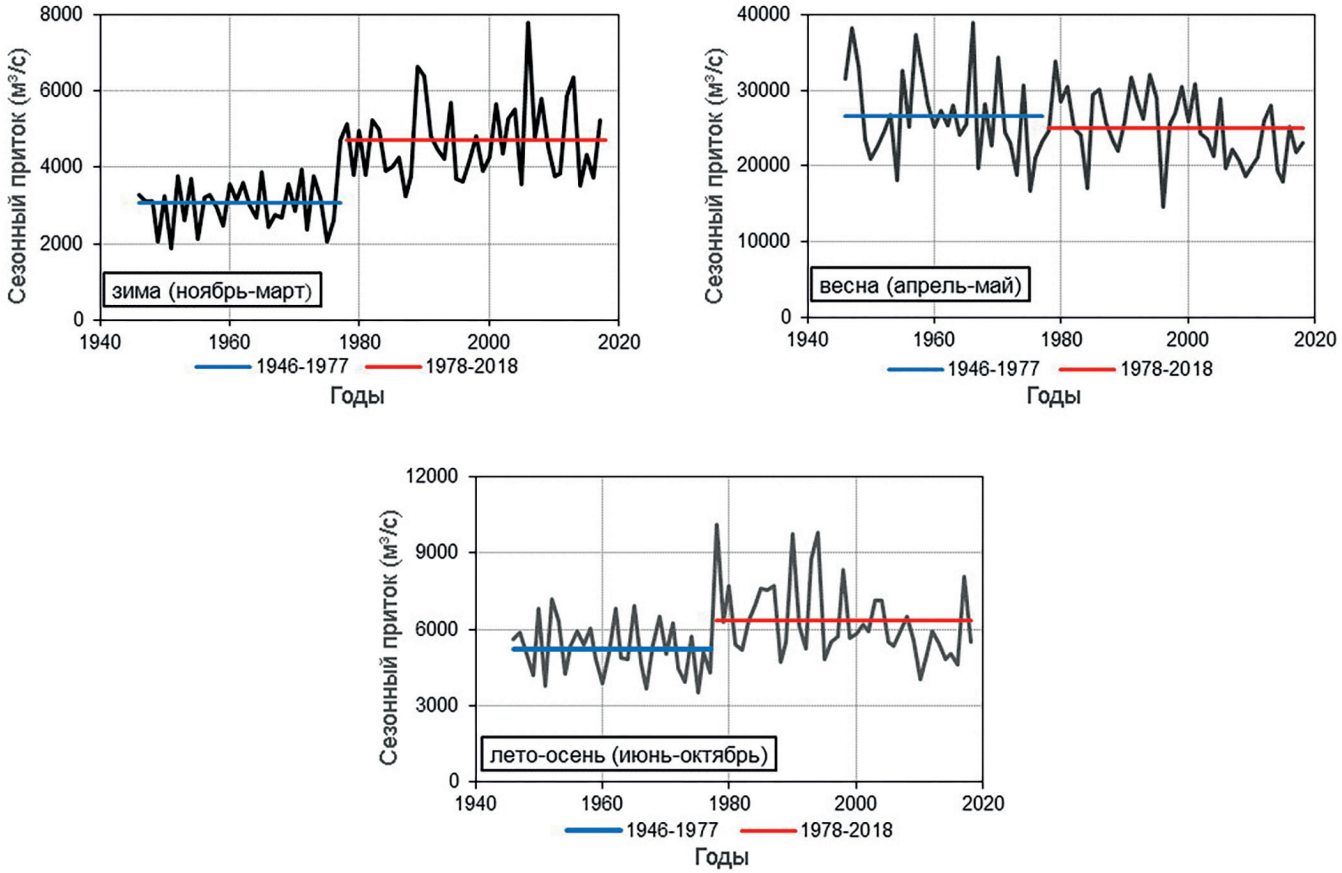



***Рис. 2.3.3.1*** *Многолетняя динамика сезонного притока речных вод к водохранилищам Волжско-Камского каскада за 1946-2018 гг. (м³/с). Синие и красные линии – средние значения за указанные периоды*

Аналогичные изменения произошли и в режиме притока речных вод в Цимлянское водохранилище (рис. 2.3.3.2), являющееся крупнейшим регулятором стока юга Европейской территории России и решающее проблемы водоснабжения промышленности и сельского хозяйства развитого региона страны, а также обеспечивающее гарантированные судоходные попуски по Нижнему Дону. При увеличении притока зимой и летом – осенью, соответственно, на 46 и 39%, и его снижении весной на 28% средний годовой приток к Цимлянскому водохранилищу за рассматриваемый период времени практически не изменился.

В период современного потепления увеличился приток к водохранилищам Азиатской территории России (АТР) в зимние месяцы, при резком возрастании амплитуды его колебаний. На крупнейших водохранилищах, расположенных в центральной (Вилюйское) и северо-восточной (Колымское) частях АТР, произошло увеличение приточности во все сезоны года.

Следует особо отметить, что большинство водохранилищ страны регулируется по устаревшим правилам их использования. Так, для водохранилищ Волжско-Камского каскада эти правила разработаны в начале 1980-х годов и, естественно, не учитывают изменения в режиме притока речных вод, произошедшие в последние 40 лет.

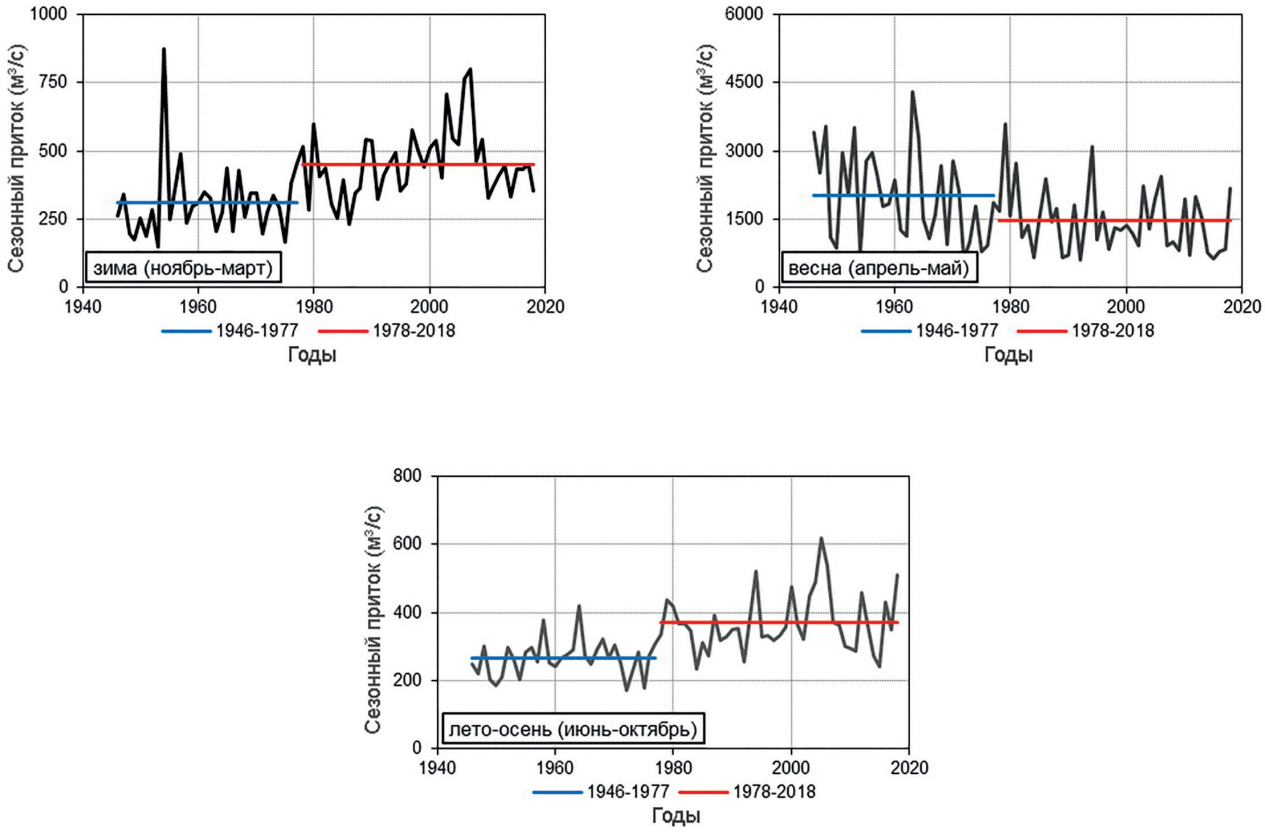



***Рис. 2.3.3.2*** *Многолетняя динамика сезонного притока речных вод к Цимлянскому водохранилищу за 1946-2018 гг. (м³/с). Синие и красные линии – средние значения за указанные периоды*

Для регионов с наиболее заметными происходящими и ожидаемыми изменениями водного режима рек (бассейн Дона, юг и юго-запад ЕТР, крупные реки восточной Сибири, см. главы 1.2.1, 1.2.2) актуальной задачей является пересмотр основных гидрологических параметров, определяющих режим эксплуатации водохранилищ, включая расходы воды различной вероятности превышения, и корректировка правил использования их водных ресурсов.

Неравномерное распределение по территории страны водных ресурсов, населения, объектов промышленного и сельскохозяйственного производства предопределяет наличие региональных дефицитов воды, необходимой для устойчивого развития национальной экономики.

Дефициты водных ресурсов для обеспечения нужд питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, усугубляющиеся в периоды малой водности, регулярно возникают в Республике Калмыкия, Белгородской и Курской областях, Ставропольском крае, отдельных районах Южного Урала и юга Сибири (рис. 2.3.3.3), а также для обеспечения сельскохозяйственных нужд на территории Саратовской, Астраханской, отдельных частях Волгоградской и Оренбургской областей, на Северном Кавказе. В перспективе к середине XXI столетия, в соответствии с имеющимися сценарными оценками, полученными

по ансамблю гидродинамических моделей CMIP6 (см. главу 1.2.2), на преобладающей территории страны годовой сток будет возрастать, за исключением южных частей ЕТР и Западной Сибири, что усугубит проблему водообеспеченности этих регионов, которая уже в настоящее время является низкой, а может стать катастрофически низкой.

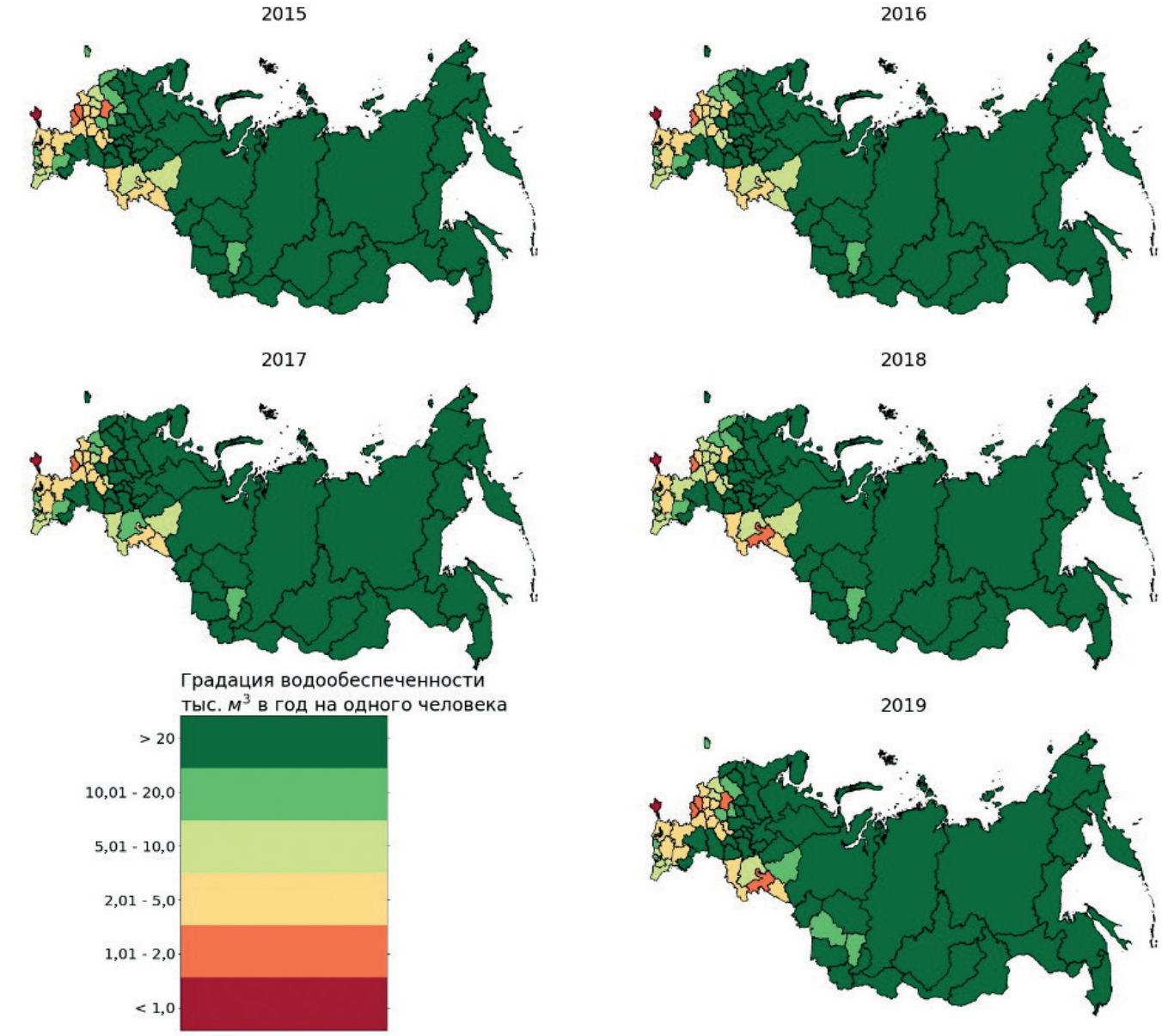



***Рис. 2.3.3.3*** *Водообеспеченность регионов Российской Федерации, 2015-2019 гг. (по данным ФГБУ «ГГИ»)*

Для устранения или в значительной мере смягчения дефицита водных ресурсов необходимо осуществить комплекс мероприятий по сокращению потерь воды в системах водоснабжения и мелиоративных сетях, по переходу на водосберегающие технологии полива, замещение водоемких производств маловодоемкими, а также по дополнительному регулированию стока.

В ряде случаев возникновение дефицита обусловлено отсутствием комплексного подхода к использованию водных ресурсов. Сложный узел проблем возник в низовьях Волги, где требу-

ется системное переустройство водохозяйственного комплекса для оптимизации использования водных ресурсов в целях водоснабжения населения, сельскохозяйственного производства, рыбного хозяйства, сокращения холостых сбросов и потерь выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях Волжско-Камского каскада, а также сохранения уникальной экосистемы Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волга. Сложная водохозяйственная ситуация периодически складывается также в бассейнах рек Кубань и Терек. В целом для южной части ЕТР на протяжении XXI века ожидается, наряду с прогрессирующим потеплением, уменьшение осадков летнего сезона (Катцов и др., 2022), что увеличит риски маловодий на реках в период с наибольшей потребностью в воде.

Одним из объектов, требующих наиболее пристального внимания в контексте климатообусловленных изменений элементов водного баланса, является бассейн р. Дон, где на протяжении текущего столетия вероятна тенденция уменьшения годового стока (см. главу 1.2.2), в особенности его нижняя часть, включая Цимлянское водохранилище. На Нижнем Дону в течение 12 лет, с 2007 по 2018 г., годовой сток был ниже нормы, в среднем на 33%. В результате водохранилище Цимлянской ГЭС не наполнялось до необходимых отметок, что привело к резкому снижению объемов грузопассажирских перевозок на Нижнем Дону, ухудшению экологического состояния реки и ограничению водопотребления всех категорий пользователей. Произошли кардинальные изменения в гидрологическом режиме водохранилища. Заметно повысилась температура воды для всех месяцев, когда водоем свободен ото льда. Изменились сроки начала прогревания водоема и его охлаждения, что выразилось в сдвижке перехода температуры воды через 0, 2, 4, 10 °C на более ранние даты весной и более поздние осенью (Основные гидрологические характеристики, 2020).

На озере Байкал (часть Иркутского водохранилища) в 2014-2017 гг. наблюдалось экстремальное маловодье, в течение которого приток в озеро составил всего 64% от нормы. В результате уровень озера не удалось удерживать на установленной законодательством минимально допустимой отметке. Это маловодье явилось причиной возникновения целого ряда водохозяйственных и экологических проблем, что потребовало приостановления действия Правительства Российской Федерации от 26 марта 2001 г. № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности». В отношении будущих водных ресурсов озера, а следовательно, и положения его уровня, имеется большая неопределенность, поскольку модельные оценки CMIP6 имеют разнонаправленный характер, а среднее изменение по ансамблю моделей не превышает межмодельный разброс (см. главу 1.2.2).

**Негативное воздействие вод**

По данным Росгидромета, в период с 1991 по 2020 г. в целом по стране отмечается тенденция увеличения опасных гидрологических явлений (ОГЯ), принесших материальный ущерб (рис. 2.3.3.4). В многолетнем ряду всех случаев ОГЯ выявлен статистически значимый положительный тренд (Козлов и др., 2021). Основной причиной материальных ущербов является повышение уровня воды водных объектов сверх критических отметок в период дождевых паводков и весеннего половодья. За период 1991-2020 гг. было зафиксировано 561 наводнение, вызванное дождевыми паводками, и 487 наводнений в период весеннего половодья,

принесшие материальные потери. При этом доля быстроразвивающихся наводнений дождевого происхождения на рассматриваемом отрезке времени возрастает.

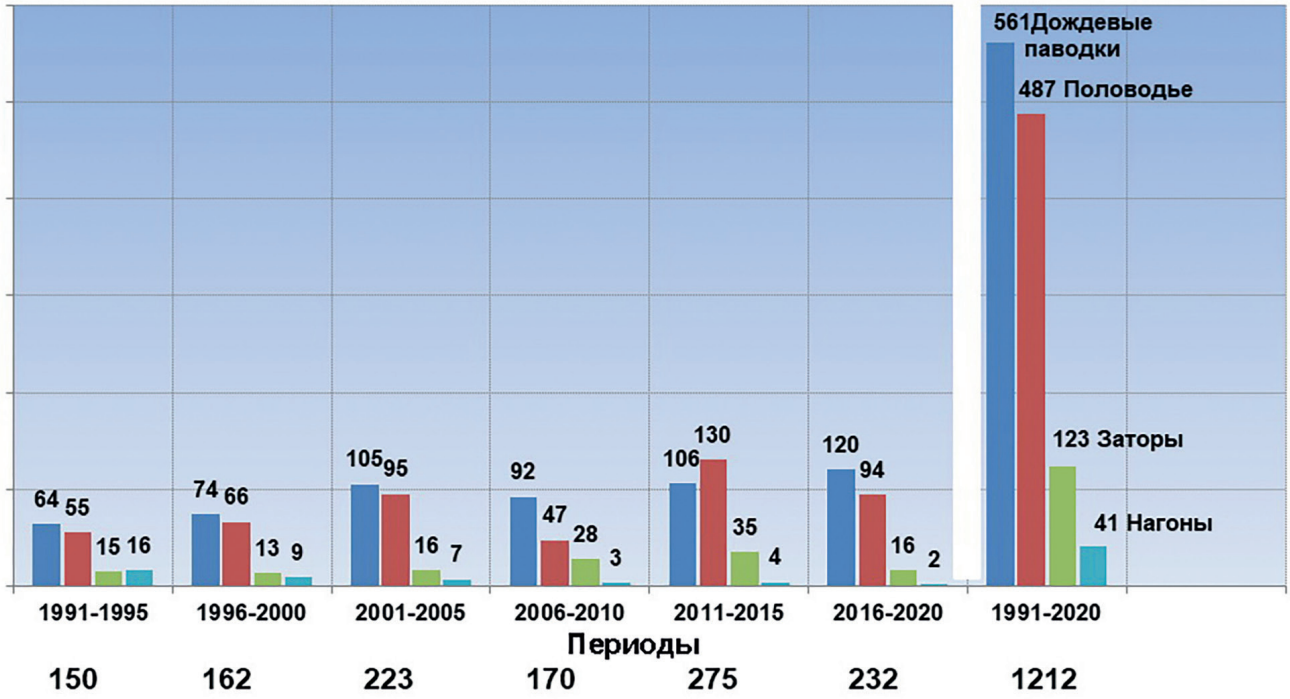



***Рис. 2.3.3.4*** *Число опасных наводнений различного генезиса на реках России с зафиксированным ущербом*

Общее число всех ОГЯ за последнее десятилетие (2011-2020 гг.) по сравнению предыдущим (2001-2010 гг.) увеличилось на 13%. Число опасных наводнений в половодье увеличилось на 58, заторных наводнений – на 16, опасных паводков – на 15%. Число опасных нагонных наводнений уменьшилось на 40, а селей – на 36% (Шамин, Санина, 2018а, б).

Одной из причин увеличения ущербов от наводнений, наряду с климатическими, может являться интенсивное хозяйственное использование прибрежных территорий. Так, например, на реках северо-запада России на большинстве гидрологических постов опасные отметки достигаются при уровнях воды, превышающих обеспеченность 10% (один раз в 10 лет), что можно объяснить нахождением хозяйственных объектов в систематически затапливаемых низких участках пойм рек. Это не позволяет, основываясь только на данных о зафиксированных материальных ущербах в результате возникновения ОГЯ, сделать окончательные выводы об увеличении, например, повторяемости опасных наводнений, как в отдельных регионах, так и по стране в целом.

Как показано в главе 1.2.1, тенденции изменений максимальных расходов воды рек страны в условиях происходящего потепления климата неоднозначны. Увеличение повторяемости опасных гидрологических явлений, в качестве показателя которых рассматривалось число лет с превышением расхода 10%-й обеспеченности, следует ожидать для районов, где отмечено увеличение максимальных расходов воды и их изменчивости, по сравнению с базовым периодом (Георгиевский и др., 2019а).

В условиях современных изменений климата особую опасность представляют дождевые паводки, интенсивность и повторяемость которых в ряде регионов страны увеличивается (Научно-прикладной справочник, 2021; Frolova et al., 2017; Алексеевский и др., 2016). Об этом свидетельствует и рост экстремально сильных паводкообразующих осадков (Frolova et al., 2017).

Дождевые паводки с разрушительными последствиями произошли в последние два десятилетия в Краснодарском крае (Алексеевский и др., 2016), Амурской области и в Хабаровском крае (Фролов, Георгиевский, 2014; Данилов-Данильян и др., 2014), Иркутской области (Кичигина, 2020; Георгиевский и др., 2020). Экстремальный за последние годы паводок, принесший человеческие жертвы и многомиллиардные ущербы, произошел в конце июля 2019 г. на левобережных притоках р. Ангара, берущих начало в горах Восточного Саяна. Было затоплено 109 населенных пунктов, включая г. Тулун (Кичигина, 2020). В конце июля этого же года прошел второй паводок, пострадало 58 населенных пунктов. Общий ущерб от двух паводков составил 35,1 млрд руб., из них более 20 млрд – ущерб инфраструктуре и административным объектам, около 10,8 млрд – из-за утраты жилья, около 420 млн руб. – потери аграрного комплекса (Кичигина, 2020). Данные многолетних наблюдений за стоком р. Ия (рис. 2.3.3.5) свидетельствуют об увеличении частоты формирования высоких максимальных расходов и слоев дождевых паводков в последние десятилетия.

В соответствии с имеющимися оценками (Росгидромет, 2017), в перспективе к середине настоящего столетия экстремальность осадков в летний период и частота опасных наводнений в горных районах Кавказа, в Сибири и на Дальнем Востоке могут увеличиться. Результаты вероятностного сценарного прогнозирования климата показали (Катцов и др., 2020), что в горных районах Кавказа к середине XXI века ожидается наиболее значительное, свыше 30%, увеличение суточных сумм осадков в теплый период.

Особый интерес, с точки зрения обеспечения безопасности прибрежных территорий рек и гидротехнических сооружений, представляют данные о наибольших за весь период наблюдений максимальных расходах воды, наблюденных в последние десятилетия, и результаты оценки их обеспеченности. Катастрофические наводнения при прохождении максимальных расходов воды редкой повторяемости представляют наибольшую опасность для населения и экономики прибрежных районов. Ярким примером таких событий в первые десятилетия XXI столетия являются наводнения, вызванные дождевыми паводками, в бассейнах рек Кубань (2002 г.), Адагум (2012 г.), Амур (2013 г.), Ия (2019 г.). Анализ многолетних данных наблюдений на гидрологических постах в этих бассейнах, а также исторических сведений о наводнениях в доинструментальный период позволил оценить повторяемость максимальных расходов воды во время этих паводков примерно как один раз в 200 лет (Методические рекомендации, 2010; Георгиевский, Молчанова, 2015; Георгиевский и др., 2020а). На некоторых реках в начале XXI столетия были зарегистрированы наивысшие за весь период наблюдений максимальные расходы воды (реки Ветлуга, Молога, Унжа, Баксан, Абакан, Туба, Бия, Урсул, Ануй, Тура, Эльги, Нера, Уркан, Уссури, Павловка). Так, в период дождевого паводка в 2014 г. на ряде рек бассейна Верхней Оби сформировался наивысший за весь период наблюдений мак-

симальный расход воды (Зиновьев и др., 2015). Выполненная оценка показала, что обеспеченность максимального расхода р. Бия у г. Бийск, где наблюдения проводятся с 1895 г., составила 0,8%. Расходы аналогичной обеспеченности были зарегистрированы в 2014 г. и на других реках бассейна Верхней Оби (реки Урсул, Ануй). Обеспеченность исторических максимумов на перечисленных выше реках находится в интервале 0,8-1,0%.

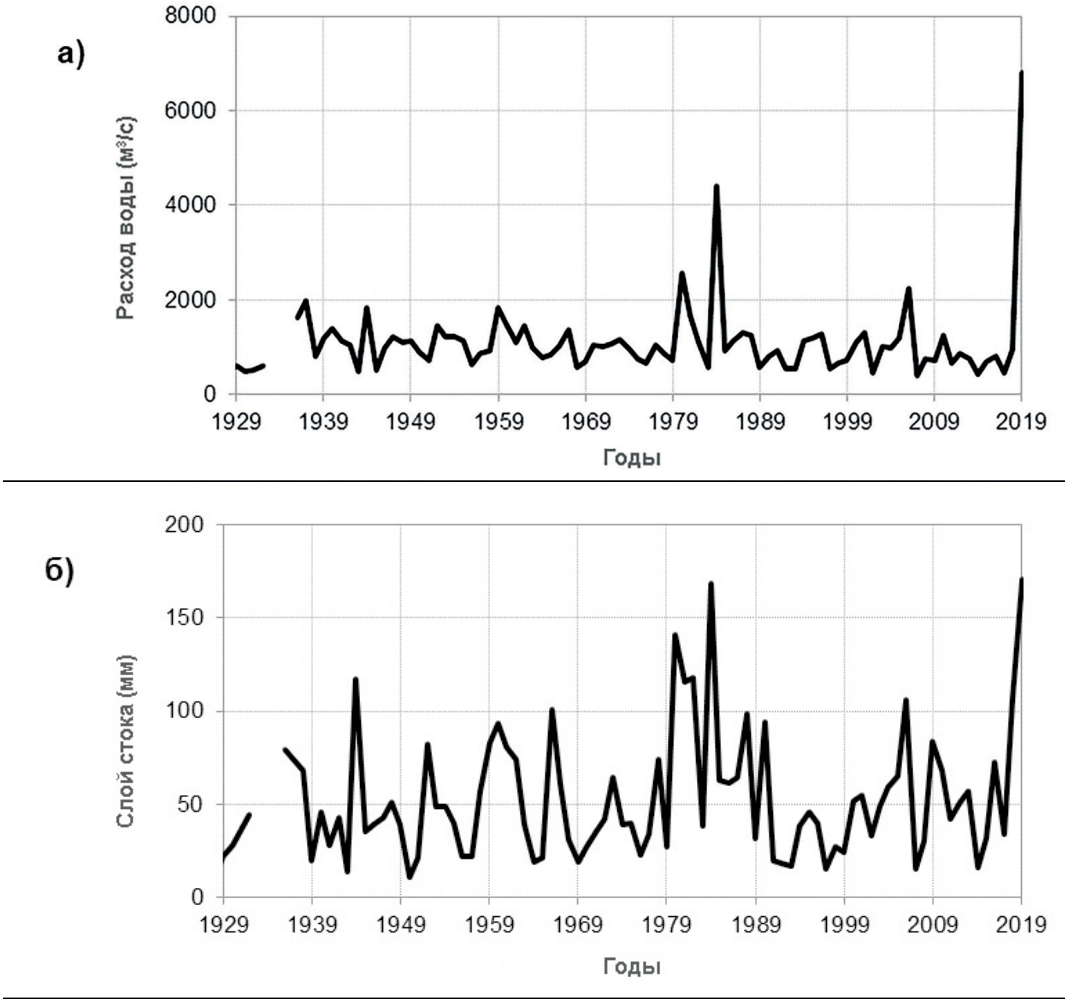



***Рис. 2.3.3.5*** *Многолетние колебания максимальных расходов воды (а) и слоев паводочного стока (б) р. Ия – г. Тулун, за период с 1929 по 2019 г. (Георгиевский и др., 2020)*

Другим видом ОГЯ являются маловодья, негативные последствия которых обусловлены низким стоком и понижением уровней воды ниже критических отметок, при которых нарушается работа водозаборов или прекращается навигация на судоходных реках. Экономические потери в результате экстремально низкого стока в текущем столетии увеличились почти в пять раз по сравнению с последним десятилетием предыдущего (Frolova et al., 2017). Значительные экономические ущербы нанесли маловодья, сформировавшиеся на значительной части ЕТР в 2010 и 2014 гг., когда из-за низкого уровня воды судоходство было практически остановлено (Kireeva et al., 2016).

Результатом маловодий могут быть не только материальные ущербы, на долю которых приходится 14% от всех ОГЯ (Козлов и др., 2021), но и возникновение чрезвычайных ситуаций

регионального масштаба (Георгиевский и др., 2019б). Такие ситуации возникали неоднократно в последние годы на реках, по которым производится северный завоз продукции, необходимой для жизнеобеспечения населения, предприятий социальной сферы и жилищно-коммунального хозяйства в районах Крайнего Севера России, обеспечивая более 80% перевозок груза. Так, в результате маловодья и понижения уровня воды был сорван или не полностью обеспечен северный завоз в 2005 г. по р. Колыма, в 2013 г. по рекам Печора, Лена и Индигирка, в 2016 г. – по р. Лена, в 2018 г. – по р. Яна. В 2012 г. уровень воды на ряде рек Западной Сибири упал до критического, что сделало часть речных перевозок невозможными.

Таким образом, наряду с увеличением водности ряда крупных судоходных рек России в летне-осенний период отмечается и значительный рост изменчивости стока в теплый период года, в результате чего формируются как экстремально высокие, так и очень низкие расходы (уровни) воды в навигационный период (Георгиевский и др., 2019а). В отдельные годы такие ситуации могут лимитировать транспортное снабжение отдаленных регионов.

**Направления адаптации**

Адаптационные мероприятия в области гидрологического мониторинга должны включать в себя повышение плотности сети наблюдений, особенно в регионах, где последствия изменений климата будут сопровождаться повышением рисков возникновения опасных гидрологических явлений (Северный Кавказ, Юг Сибири, Приморье), разработку и адаптацию современных методов гидрологических расчетов и прогнозов, систем раннего предупреждения, систем поддержки принятия решений в области водного хозяйства, а также интеграцию региональных, ведомственных и корпоративных сетей мониторинга.

В области управления водными ресурсами приоритетными являются мероприятия, направленные на усовершенствование нормативно-правовой и научно-методической базы, в том числе учет гидрологических последствий изменений климата в схемах комплексного использования и охраны водных объектах (СКИОВО), правил использования водных ресурсов водохранилищ (ПИВР), а также развитие подходов к комплексному управлению городскими водными ресурсами, сохранению и реабилитации малых водных объектов урбанизированных территорий.

Адаптационные мероприятия по борьбе с наводнениями включают в себя инженерные (строительные) и неинженерные методы. К первой группе относятся регулирование речного стока за счет строительства водохранилищ; создание дамб обвалования и отводных каналов; спрямление, углубление и расширение русел с целью увеличения их пропускной способности; искусственное повышение отметок затапливаемых участков; усовершенствование, в том числе с помощью «зеленых» решений, систем ливневой канализации на урбанизированных территориях. Перспективными являются мероприятия по обводнению (восстановлению) выработанных или осушенных торфяных болот. К неинженерным методам защиты относятся мероприятия по регулированию землепользования на речных поймах и водосборах; ограничение или запрещение тех видов хозяйственной деятельности, в результате которых возможно усиление наводнений; зонирование территорий вероятного переселения населения и вынос объектов с затапливаемых территорий; ограничение строительства в пределах

границ зон затопления без соответствующей инженерной подготовки жилых домов, капиталоемких производств или особо ценных объектов; развитие систем страхования.

Целесообразна приоритизация мероприятий по защите от негативного воздействия вод с учетом ожидаемых изменений экстремального стока, а также внедрение водосберегающих технологий в регионах с ожидаемым повышением частоты продолжительных засух, особенно в Южном федеральном округе и в южных областях Центрального и Приволжского федеральных округов. В качестве мер по адаптации к засухам могут быть выделены следующие: резервирование воды в водохранилищах, комплексирование источников водоснабжения, в том числе за счет использования подземных, подрусловых и оборотных вод, снижение потерь воды при транспортировке. Переброска стока из других бассейнов может быть использована при надлежащем обосновании в случаях, когда потенциал иных методов уже исчерпан.

## Список литературы


**Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Колтерманн П. К., Торопов В. П. А., Школьный Д. И., Белякова П. А., 2016:** Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // Водные ресурсы – Т. 43, № 1. – С. 3-17.

**Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года, 2009:** – М.: НИА Природа. – 40 с.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2019а:** Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. – № 11. – С. 46-55.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2020:** Условия формирования катастрофического паводка 2019 года на реке Ие и оценка его характеристик // География и природные ресурсы. – № 4. – С. 86-94.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Марков М. Л., Молчанова Т. Г., 2019б:** Опасные гидрологические явления на реках арктической зоны Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 4. – С. 89-98.

**Георгиевский В. Ю., Молчанова Т. Г., 2015:** Оценка вероятностных характеристик наивысших уровней воды р. Амур у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре / В сб. Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты: сборник научных трудов. – СПб.: ООО «ЭсПэХа». – С. 52-61.

**Данилов-Данильян В. И., Гельфан А. Н., Мотовилов Ю. Г., Калугин А. С., 2014:** Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. – № 41(2). – С. 111-122.

**Зиновьев А. Т, Кошелев К. Б., Дьяченко А. В., Коломейцев А. А., 2015:** Экстремальный дождевой паводок 2014 года в бассейне Верхней Оби: причины, прогноз и натурные наблюдения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – № 6. – С. 93-104.

**Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2022:** Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды ГГО. – Вып. 604. – С. 5-54.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Кичигина Н. В., 2020:** Опасность паводочных наводнений в бассейнах левых притоков Ангары // География и природные ресурсы. – № 4. – С. 45-55.

**Козлов Д. В., Снежко Н. В., Лагутина Н. В., 2021:** Опасные гидрологические явления на территории Российской Федерации: многомерный анализ и районирование // Метеорология и гидрология. – № 11. – С. 66-75.

**Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным, 2010:** – СПб.: Нестор-История. – 162 с.

**Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации, 2021:** – СПб.: ООО «РИАЛ». – 190 с.

**Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон, 2020:** Научно-прикладной справочник. – СПб.: ГГИ. Свое издательство. – 263 с.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – СПб.: Амирит. – 106 с.

**Фролов А. В., Георгиевский В. Ю., 2018:** Изменения водных ресурсов в условиях потепления климата и их влияние на приток к крупным водохранилищам России // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 67-76.

**Фролов А. В., Георгиевский В. Ю., 2014:** Экстремальный паводок 2013 г. в бассейне р. Амур. Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации / Сб. докл. – М.: Изд-во НИЦ «Планета». – С. 5-39.

**Шамин С. И., Санина А. Т., 2018а:** Основные тенденции изменения частоты появления опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – Вып. 183. – С. 42-50.

**Шамин С. И., Санина А. Т., 2018б:** Оценка частоты появления опасных гидрометеорологических явлений, нанесших ущерб субъектам Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – Вып. 184. – С. 54-60.

**Frolova N. L., Kireeva M. B., Magrickiy D. V., Bolgov M. V., Kopylov V. N., Hall J., Semenov V. A., Kosolapov A. E.,**

**Korobkina E. A., Rets E. P., Akutina Y., Djamalov R. G., Efremova N. A., Sazonov A. A., Agafonova S. A., Belyakova P. A., 2017:** Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // Natural Hazards, v. 88, pp. 103-131.

**Kireeva M. B., Frolova N. L., Winde F., Dzhamalov R. G., Rets E. P., Povalishnikova E. S., Pahomova O. M., 2016**: Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards // Geography, environment, sustainability, v. 9, № 4, pp. 33-47.

## 2.3.4 Лесное хозяйство

***В. Н. Коротков, А. В. Константинов***

### 2.3.4.1 Краткая характеристика лесного хозяйства России

Лесное хозяйство – отрасль экономики, которая направлена на воспроизводство лесов, охрану их от пожаров и защиту от вредных организмов и иных негативных факторов, регулирование использования лесов и учет лесных ресурсов в целях удовлетворения потребностей экономики в древесине и другой лесной продукции при сохранении экологических и социальных функций леса.

Леса России, занимая одну пятую часть площади лесов мира и являясь одним из возобновляемых природных ресурсов, удовлетворяют множественные потребности экономики и общества в лесных ресурсах, выполняют важнейшие средообразующие, средозащитные и иные полезные функции. Почти две трети (около 65%) общей площади российских лесов занимают бореальные леса, произрастающие в условиях сурового климата.

По данным Росреестра, по состоянию на 01.01.2020 г. лесные земли Российской Федерации охватывали 897,0 млн га. В состав лесных земель входят земли, занятые лесными насаждениями (покрытые лесной растительностью), а также земли, предназначенные для выращивания леса, но временно лишенные лесного покрова (гари, погибшие насаждения, сплошные вырубки и др.) (см. табл. 2.3.4.1). Основная площадь лесных земель входит в состав Лесного фонда (по данным Рослесхоза – 863,4 млн га, или 96,3% от их общей площади), по которому существует наиболее подробная информация о породно-возрастном составе лесов. По лесным землям особо охраняемых природных территорий (2,1%), землям обороны и безопасности (0,4%), городским лесам (0,1%) в официальной статистике собирается менее подробная информация. Остальная площадь лесных земель (1,1%) приходится на иные категории, однако информация по ним отсутствует.

***Таблица 2.3.4.1***

*Распределение лесных земель по категориям (по данным Росреестра и Рослесхоза на 01.01.2020 г.)*

| Категории земель | Площадь лесных земель, млн га | Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытые лесной растительностью), млн га |
|---|---|---|
| Земли Лесного фонда | 863,39 | 766,63 |
| Леса на землях особо охраняемых природных территорий | 19,07 | 18,05 |
| Леса на землях обороны и безопасности | 3,99 | 3,65 |
| Леса на землях населенных пунктов | 1,05 | 0,99 |
| На землях иных категорий | 9,51 | 8,74 |
| Итого | 897,01 | 798,06 |

Естественное формирование лесного покрова возможно на заброшенных сельскохозяйственных землях, однако они не включены в официальные данные учета лесов. По последним оценкам, покрытая лесом площадь на заброшенных пахотных землях составляет около 34 млн га (Барталев, Лукина, 2021).

Средняя лесистость территории России в последние десятилетия была достаточно стабильной. В настоящее время она составляет 46,5% (Лескинен и др., 2020), однако в разных регионах лесистость сильно варьирует – от 0,2% (Республика Калмыкия) до 82,5% (Иркутская область). Около двух третей всех лесов в Российской Федерации произрастает на многолетней мерзлоте, которая занимает обширные территории Сибири и Дальнего Востока.

По данным государственного лесного реестра за 2019 г., общий запас древесины в российских лесах составил $82{,}5 \cdot 10^9$ м$^3$, из которых $79{,}4 \cdot 10^9$ м$^3$ приходилось на леса Лесного фонда[1]. Эти оценки не включают в себя запас лесов на заброшенных сельскохозяйственных землях. Некоторыми авторами высказывается мнение о том, что запас древесины в российских лесах занижен как минимум на 10-20% (Швиденко, Щепащенко, 2011). Согласно последним оценкам, основанным на данных дистанционного мониторинга, в период с 2006 по 2020 г. запас стволовой древесины во всех лесах России (с учетом сухостоя) изменялся в диапазоне от $112{,}1 \cdot 10^9$ м$^3$ до $117{,}1 \cdot 10^9$ м$^3$ и демонстрирует позитивный тренд со средним ежегодным приростом $314{,}5 \cdot 10^6$ м$^3$ в год (Bartalev et al., 2021).

Среди занятых основными лесообразующими породами земель Лесного фонда преобладают хвойные насаждения (преимущественно лиственницы, сосны и ели), занимающие 76% площади. Мягколиственные насаждения (преимущественно березы и осины) занимают 22% площади, на остальную территорию (2%) приходятся насаждения твердолиственных пород, прочих пород и кустарников.

В соответствии с лесным законодательством Российской Федерации, леса, расположенные на землях Лесного фонда, подразделяются на защитные (284,6 млн га, или 24,9%), эксплуатационные (594,5 млн га, или 51,9%) и резервные леса (266,2 млн га, или 23,2%). Такое деление регулирует особенности ведения лесного хозяйства в зависимости от социально-экономического и экологического значения лесов.

Как отмечается в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 г. № 312-р, проблемы сохранения и использования лесов становятся все более многообразными и сложными. Изменяются стандарты управления лесами, которые должны отвечать возросшим международным, социальным, экологическим и экономическим требованиям. Увеличиваются усиленные последствиями изменения климата угрозы гибели лесов от пожаров, вредных организмов и других неблагоприятных факторов, риски утраты лесами биологического разнообразия. Среди факторов, сдерживающих развитие лесного сектора экономики, выделяются:

– отсутствие достоверных актуальных сведений об имеющихся лесных ресурсах;

[1] https://rosstat.gov.ru/emiss

– отсутствие зонирования территории Лесного фонда Российской Федерации по интенсивности ведения лесного хозяйства;
– низкий объем вырубаемой древесины с единицы площади эксплуатационных лесов;
– крайне недостаточный уход за лесами, который не позволяет использовать плодородие лесных почв и обеспечить максимальный прирост древесины, что, в свою очередь, ограничивает возможности увеличения объемов заготовки на уже вовлеченных в эксплуатацию лесах;
– недостаточная эффективность лесовосстановления, не позволяющая достичь приемлемых при текущем уровне лесопользования темпов воспроизводства хозяйственно ценных лесов на наиболее продуктивных лесных землях, что требует освоения новых лесных районов, как правило, не обеспеченных транспортной инфраструктурой (экстенсивная модель лесопользования).

Углеродный бюджет российских лесов оценивается по различным методикам. Официальные национальные сообщения для РКИК ООН основаны на данных Государственного лесного реестра (ГЛР). По этим данным сток углерода составляет 150-200 Мт С/год, что ниже, чем большинство других оценок. Применение этого подхода ко всем российским лесам, а не только к управляемым, привело к оценке поглощения углерода в диапазоне 206-230 Мт С/год (Zamolodchikov et al., 2017). Сходный результат – 260 Мт С/год был получен с использованием канадской модели CBM-CFS3 по данным государственного лесного реестра (Замолодчиков и др., 2014). Другие оценки с использованием официальных данных ГЛР, показали, что сток углерода составляет от 400 до 650 Мт С/год (Филипчук и др., 2017), однако эти оценки имеют методические недостатки, связанные с использованием в расчетах среднего прироста (Zamolodchikov et al., 2017). Многочисленные исследования с использованием обратного моделирования оценили сток углерода на суше примерно в объеме 600-720 Мт С/год (Sitch et al., 2015; Швиденко, Щепащенко, 2014); измерения потоков по методике вихревых ковариаций на 15 участках показали сток углерода в диапазоне 760-960 Мт С/год (Dolman et al., 2012), а оценки динамических моделей растительности прогнозируют сток приблизительно в объеме 200 Мт С/год (Dolman et al., 2012).

Также отмечается, что погрешность оценки запасов углерода в почве высока (Pan et al., 2011), а исследование с помощью почвенной модели показало, что колебания уровня грунтовых вод в бореальных лесах могут играть ключевую роль в определении поведения наземных экосистем как источника или стока углерода в углеродном балансе экосистемы (Kurbatova et al., 2008; дополнительно см. главу 2.1.2).

### 2.3.4.2 Воздействие изменений климата на лесное хозяйство

Прогнозы указывают, что в результате потепления в основном увеличивается чистая первичная продуктивность, продолжительность вегетационного периода и эффект $CO_2$-удобрения, возникающий при повышении концентрации $CO_2$ в атмосфере. Однако остается высокой неопределенность в отношении того, будет ли повышение продуктивности, вызванное повышенной концентрацией $CO_2$, продолжительным и в какой степени перечисленным

тенденциям могут противодействовать природные нарушения.

Различные природные нарушения оказывают серьезное воздействие на леса России. К основным факторам, влияющим на уязвимость лесного сектора при возможном изменении климата, относятся природные пожары, болезни и вредители леса, экстремальные погодные явления (Королева и др., 2017; Лескинен и др., 2020). По данным государственной статистики[1], в 2014-2017 гг. повреждения в лесах России были вызваны лесными пожарами (63%), насекомыми-фитофагами (15%), воздействием неблагоприятных погодных условий (11%), болезнями (10%) и другими факторами, такими как промышленное загрязнение (~1%).

Различные нарушения часто взаимосвязаны и могут иметь тесную связь с факторами климатической изменчивости и антропогенным воздействием. Например, засуха часто вызывает вспышки массового размножения насекомых в дополнение к ее непосредственному воздействию на леса, и оба фактора могут привести к увеличению количества лесных горючих материалов и повышению риска возникновения пожаров. Особенно велик риск повреждения древостоев в монокультурах хвойных пород.

В лесах России отмечается увеличение частоты и площади лесных пожаров, а также и других нарушений, таких как вспышки массового размножения насекомых (см. главу 2.1.1). Этому есть целый ряд причин, в том числе: 1) неудовлетворительная охрана лесов от пожаров и биогенных нарушений в связи с недостаточным финансированием, а также с недостатками управления и организации охраны лесов; 2) общее снижение уровня лесоуправления; 3) преобладание обладающих повышенной пожарной опасностью хвойных лесов; 4) повышение риска пожаров, вызванных грозовыми разрядами, особенно на малонаселенных отдаленных территориях (Лескинен и др., 2020).

**Лесные пожары**

В 2001-2019 гг. датчики MODIS ежегодно регистрировали от 8000 до 20 000 лесных пожаров (Лупян и др., 2017; Лупян и др., 2019) на площади от 2 до 11 млн га, в среднем около 5,6 млн га (Барталев и др., 2015, Барталев, 2020)). Несмотря на то что существует большая изменчивость от года к году, отмечается статистически значимая положительная тенденция увеличения площадей пожаров (Барталев, 2020). Средняя площадь лесных пожаров с 2007 года также возросла. Кроме того, площади, пройденные очень крупными пожарами, особенно велики в экстремальные годы, такие как 2012, 2016, 2018 и 2019 гг. (Барталев, 2020). Частота пожаров выше в населенных районах ЕТР, Южной Сибири и Дальнего Востока. Однако площади, пройденные пожаром, значительно выше в малонаселенной Центральной Сибири и на севере Дальнего Востока, где уровень противопожарной охраны ниже. Максимальный объем выбросов парниковых газов от лесных пожаров отмечен в 2012 г. (343,5 млн т $CO_2$-экв.), а с 2016 г. эти выбросы сохраняются на высоком уровне (Ершов, Сочилова, 2020). Средний объем выбросов парниковых газов от пожаров за 2010-2019 гг. составил 137,5 млн т $CO_2$, 0,60 млн т $CH_4$ и 4,1 тыс. т $N_2O$ (Ершов, Сочилова, 2020).

[1] https://rosstat.gov.ru/emiss

**Повреждения древостоев насекомыми-фитофагами**

Российские леса подвержены воздействию неблагоприятных факторов биотического характера, которые могут вызывать повреждение и гибель древостоев на обширных площадях. Вспышки массового размножения насекомых и очаги развития болезней нередко следуют за неблагоприятными погодными условиями, снижающими жизнеспособность деревьев. По данным MODIS, общая площадь погибших древостоев с преобладанием темнохвойных пород в 2003-2017 гг. составила около 5,54 млн га (Bartalev et al., 2021). По официальным данным, за 2013-2017 гг. площадь лесных насаждений, поврежденных вредными организмами и болезнями леса, возросла с 1841,4 тыс. га до 4805,3 тыс. га (Торжков и др., 2019).

Географическое распространение многих насекомых, вызывающих повреждение и гибель древостоев, ограничено низкими зимними температурами. Повышение температуры позволяет этим насекомым расширять свой ареал. В соответствии с наблюдаемым потеплением, зона вспышек массового размножения сибирского шелкопряда *(Dendrolimus sibiricus)*, одного из самых опасных насекомых-вредителей, сместилась на север. Вспышка массового размножения 2014 года в кедрово-пихтовых насаждениях Енисейской равнины нанесла ущерб на значительных площадях леса к северу от исторического ареала распространения сибирского шелкопряда (Kharuk et al., 2017). Другой пример – уссурийский полиграф *(Polygraphus proximus)*, который является причиной усыхания сибирских пихтовых лесов (Быстров, Антонов, 2019). Например, в Томской области им повреждено около 40% пихтовых лесов (Кривец и др., 2018; Debkov et al., 2019). Аналогичные процессы усыхания пихтовых древостоев в Красноярском крае, вызванные сильной засухой с последующей вспышкой массового размножения уссурийского полиграфа, ранее не наблюдавшегося в регионе, происходили с 2010 г. (Харук и др., 2019).

В Среднем Поволжье произошло крупномасштабное усыхание дубрав за счет повреждений, вызванных погодными условиями и последующими вспышками массового размножения насекомых-вредителей в 1991-1994 гг. (Яковлев, Яковлев, 1999). Снижение уровня влажности почвы было основной причиной массового усыхания ельников в Архангельской области в 1990-2000 гг. (Aakala, Kuuluvainen, 2011).

**Массовые ветровалы**

Репрезентативная база данных о повреждениях лесов ЕТР в результате воздействия ветра была создана за 1986-2017 гг. (Шихов и др., 2019). За этот период площадь повреждений составляла от 300 до 27 100 га в год, а в 2010 году отмечены максимальные значения – около 128 тыс. га.

**Климатические риски и возможности для лесного сектора**

Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата оказывают существенное влияние на процессы функционирования социально-экономических систем. В частности, наибольшему влиянию подвержены климатозависимые отрасли экономики, к числу которых можно отнести и лесное хозяйство.

Ожидаемые климатические изменения могут нарушить установившийся ход взаимоотношений между древесными породами на стадии естественного возобновления лесов, а также

привести к увеличению пожарной опасности в лесах. Повышение приземной температуры воздуха и связанное с ним уменьшение содержания влаги в почве могут привести к постепенному исчезновению бореальных лесов, а также к перемещению границ лесной зоны на север. Для лиственных пород изменение климата будет менее значимо, чем для хвойных. Гибель хвойных, стимулируемая вспышками массового размножения вредителей и болезней, ветровалами и пожарами, освободит пространство для возобновления пионерных мелколиственных пород (осины, березы, ольхи и ивы).

В свою очередь уязвимость лесов ведет к высокой уязвимости российской лесной промышленности. Наиболее ценными породами деревьев для лесной промышленности России являются сосна и ель, которые также уязвимы к изменению климата. Катастрофические пожары и вспышки массового размножения насекомых в последние десятилетия уничтожили высокопродуктивные хвойные леса на значительных площадях, на которых произошло возобновление раннесукцессионных видов (береза, осина и др.), имеющих меньшую экономическую ценность.

Серьезной проблемой для лесного сектора России является слабая транспортная инфраструктура, особенно отсутствие всесезонных дорог (Лескинен и др., 2020). В большинстве регионов с богатыми лесными ресурсами лесозаготовительные компании могут получить доступ к удаленным лесным районам только в зимнее время. Заготовка и транспортировка древесины сильно зависят от погодных условий. В теплые декабрьские периоды 2006, 2007, 2011, 2019 и 2020 гг. лесозаготовители испытывали существенные трудности с вывозкой древесины в регионах с недостаточно развитой транспортной инфраструктурой (Прокопьев и др., 2018).

Климатические изменения, прогнозируемые на территории регионов Российской Федерации, будут иметь различные последствия (Торжков и др., 2019). Из-за повышения среднегодовых значений температуры ожидается увеличение продолжительности вегетационного периода, что может привести к смещению границ таежной зоны на север. Одновременно ожидается увеличение числа дней с высокой горимостью в среднем на девять дней в году. Последствием подобных изменений станет замещение хвойных пород лиственными насаждениями и увеличение среднегодового прироста в диапазоне от 13 до 23% в зависимости от сценария радиационного воздействия. При этом произойдет перераспределение товарной структуры насаждений таким образом, что большим запасом древесины будут обладать лиственные породы. Такие изменения наиболее вероятны в условиях экстенсивного лесного хозяйства без достаточных мер по воспроизводству хозяйственно ценных хвойных пород, в том числе на заброшенных сельскохозяйственных землях.

В связи с наблюдаемыми изменениями климата могут появиться и дополнительные возможности для лесного сектора, который может выступать ключевым драйвером развития биоиндустрии и биоэкономики (Лукина, 2020; Лескинен и др., 2020). Рассматриваются в том числе такие аспекты, как снижение антропогенных выбросов парниковых газов за счет декарбонизации экономики, в которой лесной сектор может играть важную роль за счет замещения углеродоемких продуктов,

получаемых из невозобновляемого ископаемого сырья, на продукты из древесины. Ученые также видят возможности повышения поглощения парниковых газов лесами за счет лесоразведения на заброшенных сельскохозяйственных землях, а также с помощью лесовосстановления, нацеленного на трансформацию доминирующих в настоящее время монодоминантных одновозрастных лесов в полидоминантные разновозрастные леса (Коротков, 2017).

Несмотря на многочисленные исследования о влиянии глобальных изменений климата на российские леса, многие экологические процессы и тенденции остаются малоизученными, а степень неопределенности климатических и социально-экономических прогнозов остается высокой (Лескинен и др., 2020).

### 2.3.4.3 Адаптация лесного хозяйства к изменениям климата

Биосферное значение лесов России определяет критическую значимость повышения эффективности практики адаптивного лесоуправления в направлении поддержания климаторегулирующих функций и устойчивого развития лесного сектора экономики.

Пунктом 1 статьи 7 Парижского соглашения учреждена глобальная цель, заключающаяся в укреплении адаптационных возможностей, повышении сопротивляемости и снижении уязвимости к изменениям климата, в целях содействия устойчивому развитию и обеспечения адекватного адаптационного реагирования в контексте глобальной температурной цели.

В соответствии с пунктом 20 Климатической доктрины Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента России от 17 декабря 2009 г. № 861-рп, адаптация к изменениям климата необходима для снижения потерь и использования выгод, связанных с наблюдаемыми и будущими изменениями климата. Необходимость учета изменений климата и адаптации к ним отражены в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, утвержденную распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312-р. В условиях недостаточного контроля текущих климатических рисков система планирования адаптации в области лесного хозяйства Российской Федерации должна основываться на подходе, предполагающем оценку уязвимости. Это подтверждается также высокой степенью неопределенности будущих климатических воздействий, относительно коротким горизонтом планирования и недостаточностью средств для реализации необходимых мероприятий. Вероятно, будет полезно учитывать опыт зарубежных стран по адаптации лесного комплекса к изменениям климата (Григорьев и др., 2019).

В настоящее время при разработке региональных лесных планов предусмотрено планирование мероприятий по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов. Перечень адаптационных мероприятий представлен в типовой форме лесного плана субъекта Российской Федерации, утвержденной Приказом Минприроды России от 20.12.2017 № 692 (ред. от 27.02.2020) (табл. 2.3.4.2).

***Таблица 2.3.4.2***

*Перечень адаптационных мероприятий, согласно типовой форме лесного плана субъекта Российской Федерации (Приказ Минприроды России от 20.12.2017 № 692 (ред. от 27.02.2020)*

| Риск, вызванный климатическими изменениями | Адаптационная мера |
|---|---|
| Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадающих осадков | Корректировка длительности цикла лесоразведения и правил ухода за лесами с учетом продуктивности лесов |
| | Корректировка перечня пород, используемых для лесовосстановления и лесоразведения |
| | Принятие мер по использованию запасов древесины погибших и поврежденных насаждений |
| | Диверсификация целей лесоуправления для получения лесных продуктов и экосистемных услуг |
| Изменения в видовом (породном) составе лесов | Ориентация на выращивание разновозрастных смешанных насаждений |
| | Использование для лесовосстановления и лесоразведения видов, адаптированных к прогнозируемым климатическим изменениям древесных пород |
| | Организация особо охраняемых природных территорий с целью сохранения уязвимых видов и местообитаний |
| | Выявление и контроль численности инвазивных видов древесных пород |
| Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами | Повышение эффективности мер пожарной безопасности в лесах, предупреждение лесных пожаров, совершенствование мониторинга пожарной опасности в лесах и лесных пожаров |
| | Корректировка планов тушения лесных пожаров |
| Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах | Совершенствование системы лесопатологического обследования |
| | Совершенствование мер по предупреждению распространения вредных организмов |
| Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах | Корректировка длительности цикла лесоразведения и совершенствование технологий заготовки древесины с целью минимизации рисков ветровала и бурелома в лесах |
| | Формирование разновозрастных смешанных и многоярусных насаждений |

Лесные планы субъектов Российской Федерации включают меры по управлению рисками, связанными с изменением продуктивности и породного состава лесов, с увеличением частоты возникновения лесных пожаров, вспышек массового размножения вредных организмов, с последствиями экстремальных погодных явлений.

Совершенствование адаптации лесного хозяйства к изменению климата требует:

- разработки научно-методического руководства по оценке уязвимости лесных экосистем и инфраструктуры лесного хозяйства к наблюдаемым и ожидаемым климатическим изменениям (на уровне субъектов Российской Федерации) и сопряженного ранжирования адаптационных мероприятий по степени их приоритетности в лесном хозяйстве;
- осуществления региональных программ и планов мероприятий по адаптации к климатическим изменениям;
- совершенствования системы мониторинга показателей защищенности лесного сектора от неблагоприятных последствий изменений климата, а также мониторинга эффективности реализованных мер.

В настоящее время не вызывает сомнения необходимость разработки и внедрения адаптационных мер в лесном хозяйстве, что находит отражение в документах стратегического планирования и отраслевых программах, однако существующая отчетность в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов пока еще не включает в себя полный перечень адаптационных мероприятий, что свидетельствует о необходимости ее совершенствования.

## Список литературы


**Барталев С. А., 2020:** Крупномасштабные изменения лесов России в XXI веке по данным спутниковых наблюдений (ИКИ РАН, Москва, Россия) / Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Электронный сборник материалов конференции, Москва, 16-20 ноября 2020 года. – М.: ИКИ РАН. – С. 416.

**Барталев С. А., Лукина Н. В., 2021:** Комплексное использование данных дистанционного зондирования из космоса и наземных измерений как основа национальной системы мониторинга бюджета углерода в лесах России / Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 15-19 ноября 2021 года. – М. ИКИ РАН. – С. 1.

**Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А., 2015:** Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. – № 2. – С. 83-94.

**Быстров С. О., Антонов И. А., 2019:** Первая находка Уссурийского полиграфа Polygraphus proximus Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Иркутской области // Энтомологическое обозрение. – Т. 98, № 1. – С. 91-93, doi: 10.1134/S0367144519010088.

**Григорьев А., Щеголев А., Луговая Д., 2019:** Глобальное изменение климата и адаптация к нему лесного комплекса Северо-Западного федерального округа России: использование опыта Швеции и Финляндии // Устойчивое лесопользование. – № 2 (58). – С. 28-33.

**Ершов Д. В., Сочилова Е. Н., 2020:** Оценка прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России за 2020 год по данным дистанционного мониторинга // Вопросы лесной науки. – Т. 3, № 4. – 8 с. doi: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-8.

**Замолодчиков Д., Грабовский В., Курц В., 2014:** Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. – № 2. – С. 23-31.

**Королева Т. С., Константинов А. В., Кушнир Е. А., Торжков И. О., 2017:** Результаты стандартизированной оценки уязвимости лесного сектора Российской Федерации в условиях наблюдаемых эффектов климатической изменчивости // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. – № 3. – С. 13-22.

**Коротков В. Н., 2017:** Основные концепции и методы восстановления природных лесов Восточной Европы // Russian journal of ecosystem ecology, v. 2, № 1, 18 с. doi: 10.21685/2500-0578-2017-1-1

**Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М., Дебков Н. М., 2018:** Современное распространение и прогноз расширения инвазионного ареала уссурийского полиграфа Polygraphus proximus Blandford, 1894 в Томской области (Западная Сибирь) // Евразиатский энтомологический журнал. – Т. 17, № 1. – С. 53-60.

**Лескинен П., Линднер М., Веркерк П. Й., Набуурс Г. Я., Ван Брусселен Й., Куликова Е., Хассегава М. и Леринк Б. (ред.), 2020:** Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука 11. Европейский институт леса., 140 с. doi: 10.36333/wsctu11.

**Лукина Н. В., 2020:** Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник РАН. – Т. 90, № 6. – С. 528-532.

**Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Бурцев М. А., Дмитриев В. В., Сенько К. С., Крашенинникова Ю. С., 2019:** Лесные пожары на территории России: особенности пожароопасного сезона 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 16, № 5. – С. 356-363, doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-356-363.

**Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., 2017:** Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21-м веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 14, № 6. – С. 158-175, doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.

**Прокопьев Е. А., Рязанцев П. А., Рослякова Н. А., 2018:** Оценка влияния изменения климата на сезонную транспортную инфраструктуру (на примере лесозаготовок в Республике Карелия) // Вестник НГУЭУ. – № 2. – С. 108-122.

**Торжков И. О., Кушнир Е. А., Константинов А. В., Королева Т. С., Ефимов С. В., Школьник С. М., 2019:** Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 40-50.

**Филипчук А. Н., Моисеев Б. Н., Югов А. Н., 2017:** Сравнительная оценка статистических данных о запасах древостоев в лесах Российской Федерации // Лесохозяйственная информация. – № 2. – С. 16-25.

**Харук В. И., Шушпанов А. С., Петров И. А., Демидко Д. А., Им С. Т., Кнорре А. А., 2019:** Усыхание Abies sibirica Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна // Сибирский экологический журнал. – Т. 26, № 4. – С. 369-382, doi: 10.15372/SEJ20190401.

**Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., 2011:** Что мы знаем о лесах России сегодня? // Лесная таксация и лесоустройство. – № 1-2 (45-46). – С. 154-173.

**Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., 2014:** Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. – № 1. – С. 69-92.

**Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Ажигов И. О., Семакина А. В., 2019:** Картографическая база данных крупных ветровалов в лесной зоне Европейской части России по спутниковым данным Landsat / Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11-15 ноября 2019 года. – Москва: ИКИ РАН. – С. 466.

**Яковлев А. С., Яковлев И. А., 1999:** Дубравы Среднего Поволжья. – Йошка-Ола: Марийский государственный технический университет. – 351 с.

**Aakala T., Kuuluvainen T., 2011:** Summer droughts depress radial growth of Picea abies in pris- tine taiga of the Arkhangelsk province, northwestern Russia // Dendrochronologia, v.29, № 2, pp. 67-75.

**Bartalev S., Egorov V., Khovratovich T., Khvostikov S., Loupian E., Saigin I., Stytsenko F., Vorushilov I., Zharko V., 2021:** Multi-year national-scale monitoring of Russian forest properties using Earth observations and growth modeling for carbon assessment / The International Boreal Forest Research Association Conference, August 16-20. https://sites.google.com/alaska.edu/ibfra2021/session3.

**Debkov N. M., Aleinikov A. A., Gradel A., Bocharov A. Yu., Klimova N. V., Pudzha G. I., 2019:** Impacts of the invasive four eyed fir bark beetle (Polygraphus proximus Blandf.) on siberian fir (Abies sibirica Ledeb.) forests in southern Siberia // Geography, environment, sustainability, v.12, № 3, pp. 79-97.

**Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchebakova N., Chen T., van der Molen M. K., Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S. and Schulze E.-D., 2012:** An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences, v. 9, № 12, pp. 5323-5340, doi: 10.5194/bg-9-5323-2012.

**Kharuk V. I., Im S. T., Ranson J. K., Yagunov M. N., 2017:** Climate-induced northerly expansion of Siberian silkmoth range // Forests, v. 8, Issue 8, 9 p.

**Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N., 2008:** Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia / Biogeosciences, v. 5, № . 4, pp. 969-980.

**Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S., McGuire A. D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., 2011:** A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests // Science, v. 333, № 6045, pp. 988-993, doi: 10.1126/science.1201609.

**Sitch S., Friedlingstein P., Gruber N., Jones S. D., Murray Tortarolo G., Ahlstrom A., Doney S. C., Graven H., Heinze C., Huntingford C., Levis S., Levy P. E., Lomas M., Poulter B., Viovy N., Zaehle S., Zeng N., Arneth A., Bonan G., Bopp L., Canadell J. G., Chevallier F., Ciais P., Ellis R., Gloor M., Peylin P., Piao S. L., Le Quere C., Smith B., Zhu Z., Myneni R., 2015:** Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide // Biogeosciences, v. 12, pp. 653-679, doi: 10.5194/bg-12-653-2015.

**Zamolodchikov D. G., Grabovsky V. I., Shulyak P. P., Chestnykh O. V., 2017:** Recent decrease in carbon sink to Russian forests // Doklady Biological Sciences, v. 476, № 1, pp. 200-202, doi: 10.1134/ S0012496617050064.

## 2.3.5 Энергетика

***Е. М. Акентьева, В.В. Стадник, Д. В. Фасолько, В. Ю. Георгиевский, С. А. Журавлев***

### 2.3.5.1 Производство энергии на атомных и тепловых электростанциях

Энергетика является одним из наиболее климатозависимых секторов экономики. Влияние климата и его изменений на развитие энергетической отрасли выражается в следующем:

– климатические условия во многом определяют особенности функционирования и технико-экономические показатели всех типов электростанций, поэтому изменение климата вызовет необходимость корректировки проектирования и эксплуатации электростанций;

– климатические условия определяют потребность в энергии, следовательно, их изменение может существенно повлиять на тепло- и энергопотребление во многих регионах России;

– специфика энергетики заключается в том, что продукцию этой отрасли практически невозможно накапливать и сохранять, поэтому потребности в энергии должны быть спрогнозированы и учтены заранее;

– климатические условия в значительной мере определяют экологические последствия деятельности объектов энергетики.

Влияние климата на производство энергии, вырабатываемой на ископаемом топливе, в основном связано с эффективностью цикла генерации, требованиями к системам безопасности, включая охлаждение энергоблоков, и условиями рассеивания примесей. От совершенства системы охлаждения при прочих равных условиях зависит величина удельных расходов топлива и выбросов вредных газов $CO_2$, NO, $NO_2$, $SO_2$ в окружающую среду. Чем ниже температура охлаждающей воды, тем меньше удельный расход топлива и выбросы в атмосферу. Системы охлаждения энергоблоков электростанций делают функционирование АЭС и ТЭС в значительной степени зависимым как от температуры и влажности наружного воздуха, так и от наличия и температуры охлаждающей воды. На эффективность работы газотурбинных установок оказывают заметное влияние колебания температуры воздуха. Так, рост температуры воздуха на 5 °С уменьшает выработку энергии на 2-4% (Aivalioti, 2015). Особую тревогу вызывают изменения повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений (смерчей, ливней, экстремальных температур, скоростей ветра и т.д.), что может нанести ущерб агрегатам электростанций и подвергнуть опасности окружающие населенные пункты (Ebinger, Vergara, 2011). Поэтому в нормативных документах по строительству объектов атомной и тепловой энергетики большое внимание уделяется климатическим параметрам, характеризующим режим осадков, температуры и ветра в районах расположения электростанций.

Имеющиеся данные о связи температуры воздуха с мощностью ТЭС свидетельствуют, что при достижении критической температуры мощность выработки начинает резко снижаться (Steininger et al., 2015; Totschnig et al., 2017). Результаты расчетов, проведенных В. А. Калатузовым (2014) для градирен Липецкой, Ереванской и Артемовской ТЭС, показали универсальность зависимости мощности ТЭС от температуры наружного воздуха для различных климатических зон (рис. 2.3.5.1).

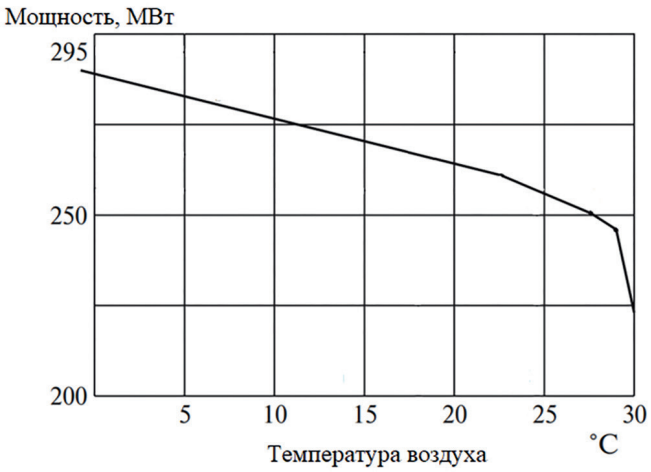



***Рис. 2.3.5.1*** *Зависимость мощности ТЭС от температуры воздуха (Калатузов, 2014)*

Большой проблемой охлаждения агрегатов электростанций является количество и качество воды, используемой в большинстве систем, что делает их крайне уязвимыми в условиях ограниченности водных ресурсов и конкуренции с другими водопользователями. С изменением климата производство электроэнергии на основе сжигания угля будет в большей степени связано с необходимостью улавливания и хранения двуокиси углерода, что увеличит спрос на воду для очистки и сжатия угля. Это может значительно увеличить требуемое количество воды, потребляемой на 1 кВт электрической мощности (Aivatoli, 2015). Кроме того, рост температуры воздуха приведет к повышению температуры воды, что отрицательно повлияет на эффективность охлаждения установки и приведет к увеличению спроса на водные ресурсы.

Изменения в доступности воды могут иметь последствия для строительства новых и эксплуатации уже существующих энергоустановок, которые будут все в большей степени конкурировать с другими водопользователями и водопотребителями (с сельским хозяйством, ЖКХ, предприятиями обрабатывающей промышленности и т.д.). Хотя отключения энергоблоков ТЭС и АЭС из-за ураганов, тайфунов и других опасных явлений в среднем по миру происходят чаще, чем сбои, вызванные недостатком воды для охлаждения, более низкие уровни водозабора из-за засухи обычно длятся дольше и, таким образом, имеют более серьезные последствия с точки зрения потери энергоснабжения (Ahmad, 2021). Поэтому местоположение новых электростанций должно быть тщательно проанализировано при принятии решений об их строительстве. Так, например, в США ряд проектов по строительству тепловых электростанций в Аризоне и Нью-Йорке был отклонен из-за возможной нехватки воды к середине XXI века в связи с климатическими изменениями (Effects of Climate Change, 2008). На территории России недостаток воды нужной температуры для охлаждения энергоблоков в будущем может угрожать электростанциям, находящимся на территории Воронежской, Курской, Белгородской областей.

Примером воздействия изменений температурного режима на работу тепловых и атомных электростанций явилась критическая ситуация в области производства электроэнергии на АЭС и ТЭС, сложившаяся аномально жарким летом 2010 года на Европейской территории России.

В условиях длительной экстремальной жары, когда высокие температуры наружного воздуха держались не только в дневные, но и в ночные часы, температура циркуляционной воды на входе в конденсаторы турбин повышалась до 35-38 °С, а на некоторых ТЭЦ – до 40 °С. Из-за жары и засухи в этот период гидростанции Волжско-Камского каскада, вырабатывающие значительную долю электричества в Европейской части России, работали с минимальной мощностью, что еще больше увеличило нагрузку на атомные и тепловые электростанции, в результате чего на некоторых АЭС произошли аварийные остановки энергоблоков. Температурные условия в районах расположения АЭС в этот период и их сравнение со средними показателями второй половины XX века приведены в табл. 2.3.5.1.

***Таблица 2.3.5.1***

*Характеристики температуры воздуха в районах расположения АЭС в периоды аварийных остановок энергоблоков*

| АЭС | Дата остановки 2010 г. | Метеостанция | $T_{ср}$ пятидневки | | | | | | T, °C, с обеспеченностью | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $T_{max}$ | $T_{min}$ | $T_{ср}$ | $T_{max}$ | $T_{min}$ | $T_{ср}$ | 0,92 | 0,98 |
| | | | до аварии | | | среднее за 1961–1990 гг. | | | | |
| Калининская | 05.08 | Тверь | 30,6 | 17,0 | 23,8 | 22,7 | 11,5 | 17,1 | 21 | 25 |
| Ленинградская | 07.08 | Санкт-Петербург | 28,8 | 19,1 | 23,9 | 22,5 | 14,7 | 18,6 | 22 | 25 |
| | 16.08 | | 28,3 | 19,0 | 23,7 | 19,8 | 12,7 | 16,3 | 22 | 25 |
| Нововоронежская | 04.08 | Воронеж | 38,4 | 19,8 | 29,1 | 25,0 | 13,9 | 19,4 | 25 | 29 |
| Курская | 22.07 | Курск | 35,3 | 22,9 | 29,1 | 24,1 | 14,2 | 19,1 | 23 | 27 |

По данным табл. 2.3.5.1 видно, что в период аварийных остановок энергоблоков сложились экстремальные погодные условия. Так, температура наиболее жаркой пятидневки, которая является важным показателем температурного режима для систем охлаждения, превысила эту характеристику относительно периода 1961-1990 гг. на 5-10 °С.

При оценке погодно-климатических рисков для функционирования АЭС и ТЭС в районах с наиболее высокой плотностью расположения объектов энергетики (рис. 2.3.5.2) в качестве влияющих факторов были выбраны изменения продолжительности и повторяемости волн тепла и засушливых периодов (Акентьева, Тюсов, 2015; Тюсов и др., 2017). Анализ результатов показал, что наибольшие риски для систем охлаждения АЭС и ТЭС наблюдаются в Центрально-Черноземном районе, характеризующемся значимыми положительными трендами продолжительности волн тепла и засушливых периодов. В зоне повышенных рисков находятся также Ростовская и Свердловская области, где повторяемость и длительность волн тепла уве-

личивается. Однако в отличие от Ростовской области, длительность засушливых периодов в Свердловской области имеет тенденцию к сокращению. Наименьшие риски для систем охлаждения электростанций характерны для Калининградской области, на территории которой практически отсутствуют изменения указанных показателей.

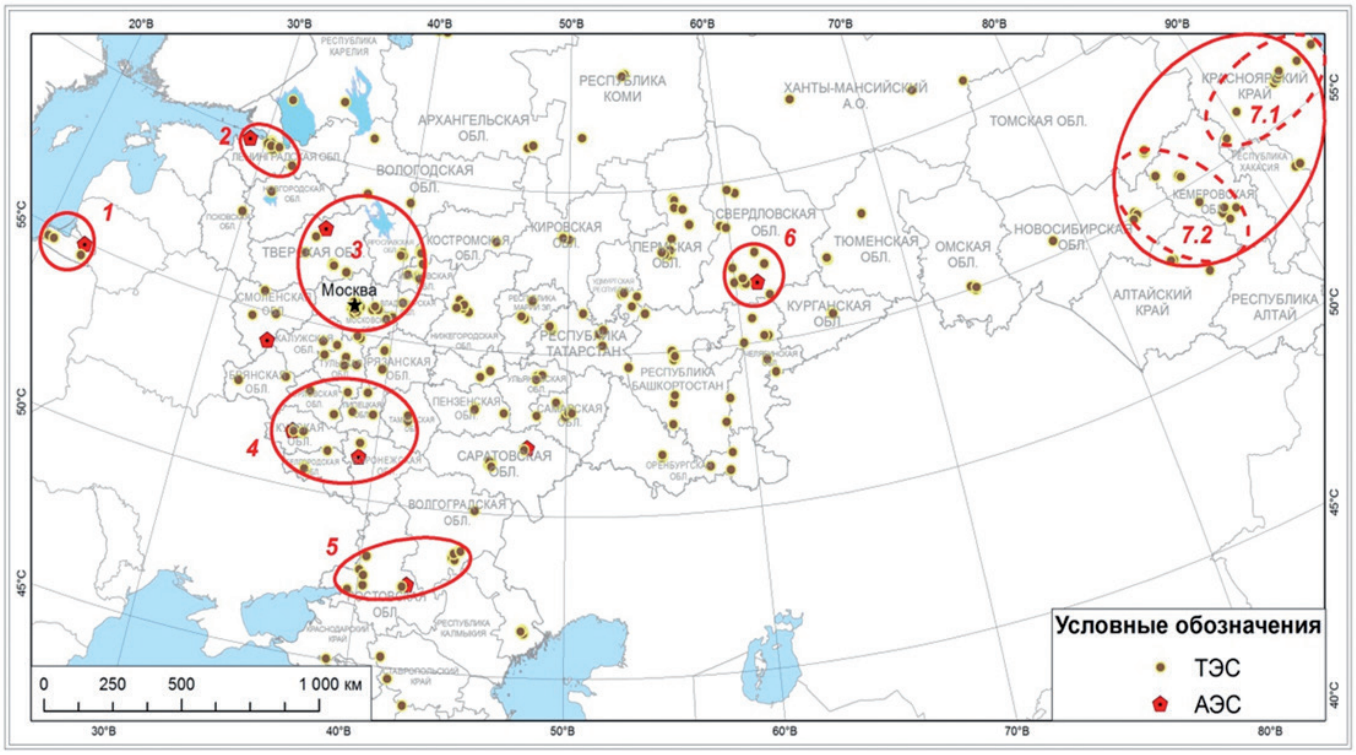



***Рис. 2.3.5.2*** *Регионы Российской Федерации с высокой плотностью расположения ТЭС и АЭС:*
*1 – Калининградская область; 2 – Санкт-Петербург и Ленинградская область;*
*3 – Центральный регион; 4 – Центрально-Черноземный регион; 5 – Ростовская область;*
*6 – Свердловская область; 7 – Южно-Сибирский регион (Тюсов и др., 2017)*

Оценка изменений указанных климатических показателей к середине XXI века по результатам региональной модели ГГО (Shkolnik et al., 2018) показала, что отношение сигнала к шуму для изменений продолжительности самой длинной волны тепла больше единицы для всех рассматриваемых районов. Наибольшего роста величины этой характеристики следует ожидать в Ростовской области и Центрально-Черноземном регионе. Прогнозные значения числа жарких периодов во всех семи районах значительно превышают величины, наблюдавшиеся в XX веке. Если в конце XX века экстремально жаркие периоды наблюдались один раз в 5-10 лет, то к середине XXI века они могут отмечаться практически ежегодно.

На основании совместного анализа наблюдаемых и ожидаемых изменений указанных индексов можно сделать вывод о том, что во всех рассматриваемых районах к середине XXI века следует ожидать практически двукратного увеличения максимальной длительности волн тепла и возрастания в 4-5 раз повторяемости лет с экстремально жаркими периодами. При этом в зоне наибольшего риска оказываются Центрально-Черноземный регион и Ростовская область. Надо отметить, что в этих районах риски бесперебой-

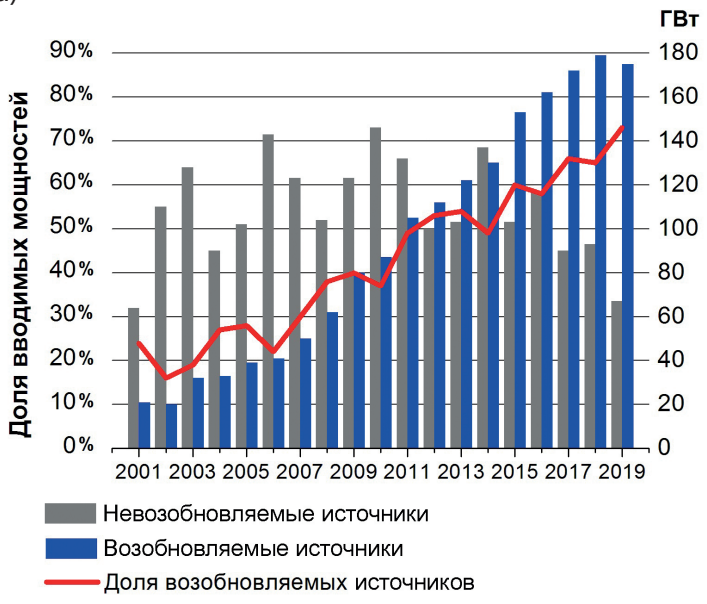
ной работы систем охлаждения энергоблоков электростанций, связанные с высокими температурами воздуха и охлаждающей воды, становятся еще более значимыми из-за увеличения потребления энергии на кондиционирование в летний период. Следовательно, именно в этих двух районах в первую очередь необходимо повысить надежность систем охлаждения агрегатов АЭС и ТЭС. На значительной части территории страны к середине XXI века ожидается увеличение частоты сухих периодов и периодов с аномально высокими температурами (Катцов и др., 2020). В зоне наибольших рисков окажутся европейская часть России и юг Западной Сибири, т.е. районы с наиболее развитой энергетической инфраструктурой. В этой ситуации для повышения надежности и эффективности работы АЭС и ТЭС становится необходимым комплексный подход к адаптации, включающий технологические, поведенческие и институциональные меры (Гашо и др., 2015, 2018а; Кобышева и др., 2015; Как разработать климатический план города, 2017; Climate Adaptation and Resilience Plan, 2021).

### 2.3.5.2 Производство энергии на возобновляемых источниках энергии

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются одной из основных, наиболее безопасных и экономически выгодных альтернатив ископаемому топливу для реализации целей сокращения выбросов парниковых газов в секторе энергетики. Благодаря высоким темпам роста генерации энергии на основе возобновляемых источников, в мире происходит снижение доли ископаемого топлива (каменного угля, нефти и природного газа) в общей структуре выработки электроэнергии (рис. 2.3.5.3а).

По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), на конец 2020 года мировая возобновляемая генерирующая мощность составила 2 799 ГВт (IRENA, 2020). Почти половина этой мощности приходится на гидроэнергию (рис. 2.3.5.3б).

а)




б)

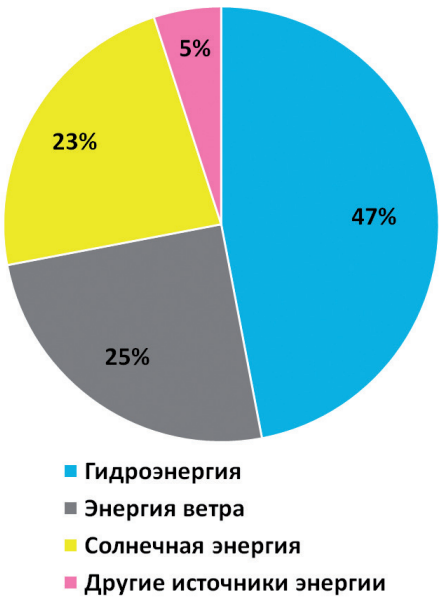



***Рис. 2.3.5.3*** *Показатели возобновляемых источников энергии в мире (IRENA, 2020):*
*а) динамика годового объема энергоресурсов в общей структуре выработки энергии,*
*б) виды возобновляемых источников энергии*

Несмотря на доминирование традиционной энергетики, в последние годы ситуация в России стала заметно меняться. Выполненные оценки (Ермоленко и др., 2017) свидетельствуют о большом потенциале возобновляемых источников энергии (табл. 2.3.5.2). Возобновляемые источники энергии являются ключевыми компонентами климатической политики России. Их развитие рассматривается в первую очередь в качестве меры по предотвращению климатических изменений и охраны окружающей среды, а также в рамках обеспечения энергоснабжения в удаленных и труднодоступных регионах.

***Таблица 2.3.5.2***

*Оценка потенциала возобновляемых источников энергии в России (млн т.у.т.) (Shepovalova, 2015)*

| Возобновляемый ресурс | Потенциал ВИЭ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | теоретический | технический | | экономический | |
| | | 2010 г. | 2020 г. | 2010 г. | 2020 г. |
| Солнечная энергия | 2 205 400 | 9695 | 29900 | 62,5 | 180 |
| Энергия ветра | 44 326 | 2216 | 3 324 | 11 | 18 |
| Малая гидроэнергия | 402 | 120 | 160 | 70 | 91 |
| Биомасса | 467 | 129 | 170 | 69 | 89 |
| Геотермальная энергия | 29 200 | 11 869 | 1 300 | 114 | 125 |
| Низкопотенциальное тепло Земли | 563 | 194 | 220 | 53 | 70 |
| Итого по ВИЭ | 2 280 358 | 24 223 | 35 074 | 379 | 573 |

*Примечание*: тонна условного топлива (т.у.т.) – единица измерения энергии, равная 29,3 ГДж; определяется как количество энергии, выделяющееся при сгорании 1 тонны каменного угля

Россия обладает богатыми ресурсами всех типов возобновляемых источников энергии (Андреенко и др., 2015), но суммарный вклад ВИЭ в ее энергетический баланс, по экспертным оценкам, не превышает 1% (рис. 2.3.5.4). Долю ВИЭ в российском энергобалансе предполагается увеличить до 4% к 2035 году (Энергетическая стратегия, 2020). Согласно базовому сценарию (IRENA, 2017), «прогнозируется двукратный рост общего использования возобновляемой энергии – с 0,6 ЭДж в 2010 году до 1,1 ЭДж в 2030 году (1 ЭДж = $10^{18}$ Дж). Это потребление будет эквивалентно 5% от общего спроса страны на энергию в 2030 году».

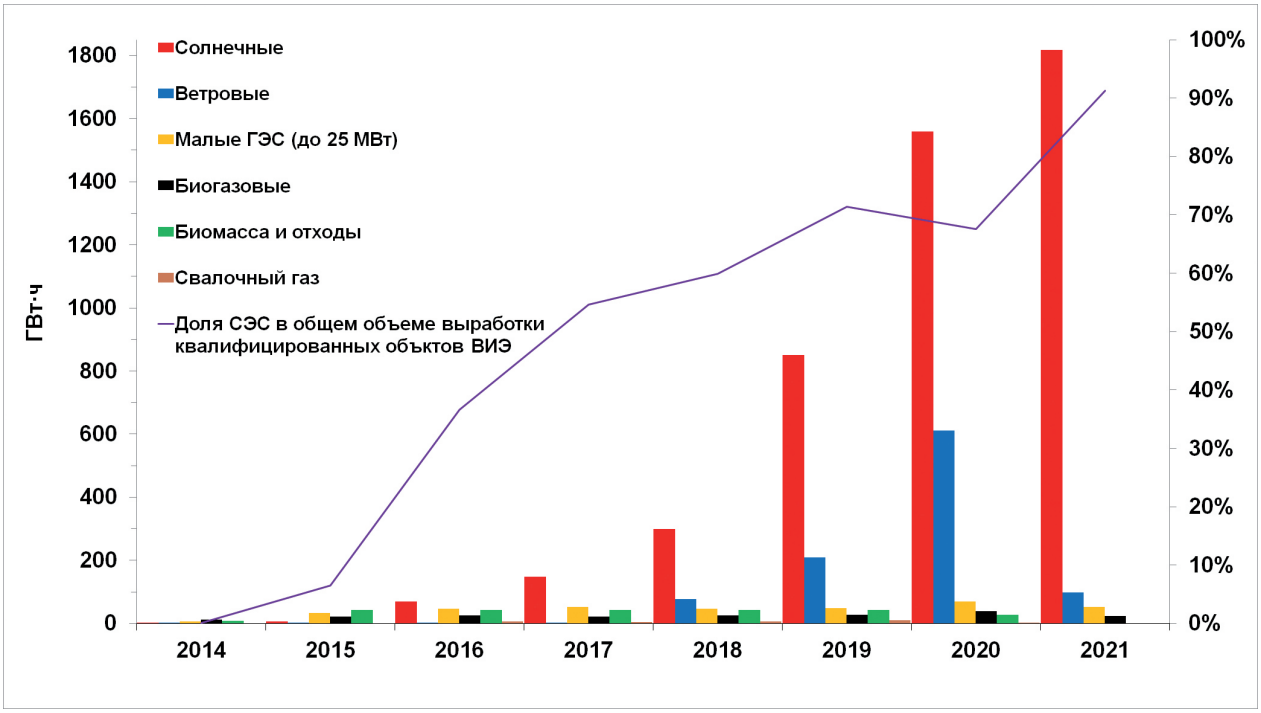



***Рис. 2.3.5.4*** *Объем выработки электроэнергии на квалифицированных объектах ВИЭ, подтвержденный сертификатами (Министерство энергетики Российской Федерации. Ассоциация «НП Совет рынка»)*

На территории России функционирует более 100 ГЭС мощностью, превышающей 10 МВт (Дворецкая и др., 2018). Крупнейшими водноэнергетическими комплексами страны являются Ангаро-Енисейский и Волжско-Камский каскады. В качестве основного источника гидроэнергия используется в Магаданской области и республиках Северного Кавказа.

Общий приток в водохранилища ГЭС является основной приходной частью водного баланса. Выработка электроэнергии на ГЭС определяется не только расходом воды, но и ее напором, создаваемым при выборе створа гидроузла (схемой создания напора). За современный период приток воды к большинству водохранилищ увеличился по сравнению с периодом 1946-1977 гг. (Научно-прикладной справочник, 2017), (рис. 2.3.5.5). Максимальное увеличение отмечено для Ириклинского (+23%) и Волховского (+23%) водохранилищ. Исключением являются Новосибирское (–7%), Зейское (–2%) и Бурейское водохранилища (–7%).

Оценки ожидаемых изменений годового стока (Тюсов и др., 2017; Георгиевский, Голованов, 2019) позволяют предположить, что до 2060 года будет увеличиваться выработка электроэнергии на ГЭС, расположенных в основном в Сибири и на Дальнем Востоке.

Суммарное увеличение выработки на ГЭС к середине XXI века оценивается в среднем по России в 4% (ЕТР – 3, бассейн Лены и Енисея – 4, бассейн Амура – 5%) (Федоров и др., 2017). Величина фактического роста выработки на ГЭС (расчеты выполнены для ГЭС Волжско-Камского каскада, Саяно-Шушенской ГЭС, Зейской ГЭС и Бурейской ГЭС) к середине XXI века составит 2,7-4,3 ТВт·ч (Федоров и др., 2017). Более точная оценка, выполненная по всем ГЭС России, показывает увеличение выработки до 7-8 ТВт·ч в год (Клименко, Федотова, 2019).

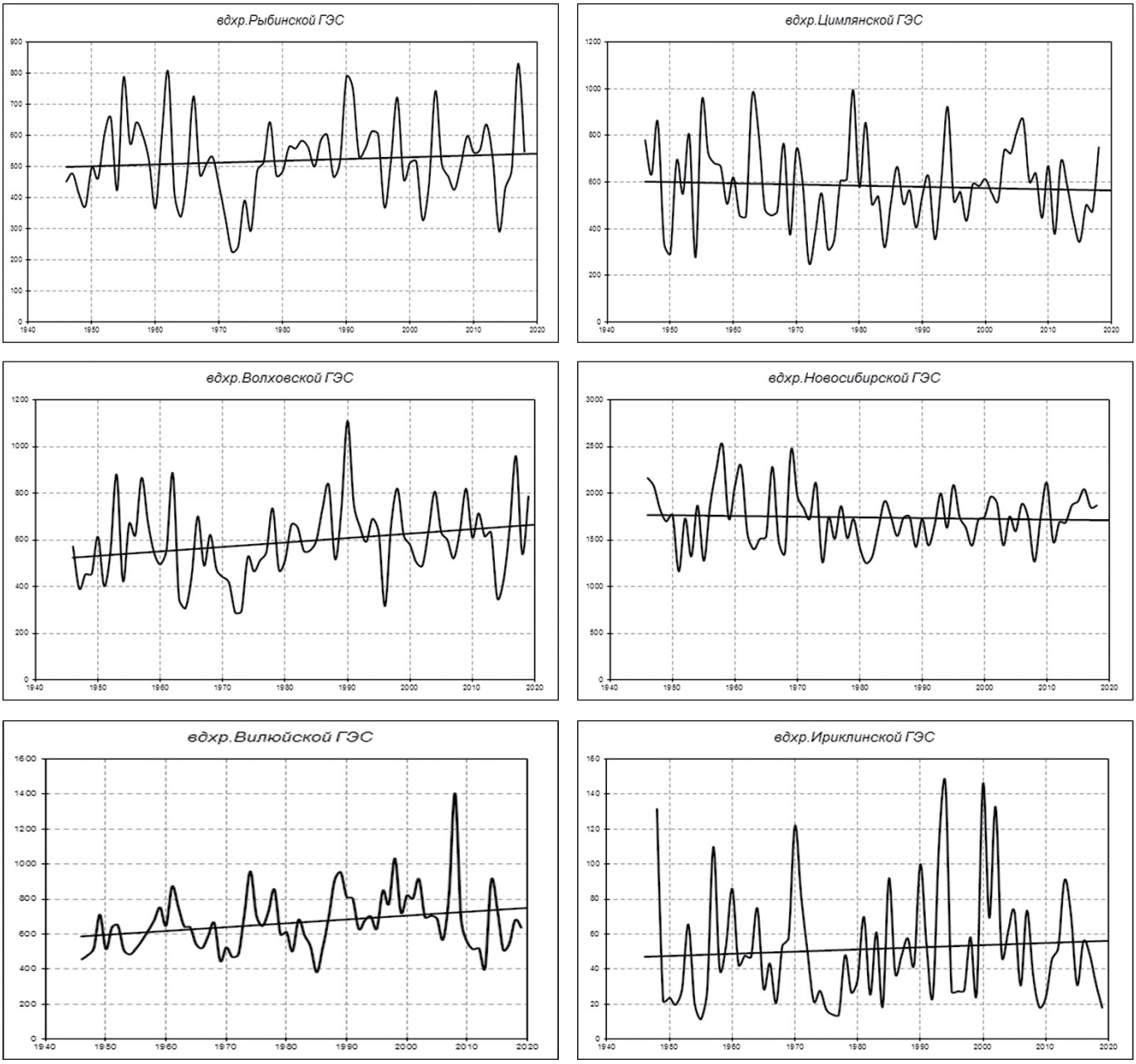



***Рис. 2.3.5.5*** *Изменения среднегодового притока воды ($м^3/с$) в водохранилища разных физико-географических зон Российской Федерации*

В настоящее время в России насчитывается 49 действующих солнечных электростанций с установленной мощностью от 5 до 105 МВт, две изолированные энергосистемы – Батагай (Якутия) и Менза (Забайкалье), проектируются и строятся 28 солнечных электростанций.

Солнечный потенциал территории России определяется поступлением солнечной радиации, изменяющейся от года к году и ото дня ко дню (Пивоварова, Стадник, 1988). Наиболее перспективными для гелиоэнергетики являются Приморский край, южная часть Хабаровского края и Амурской области, юго-восток Забайкалья и южная часть Европейской территории России (Климатические факторы, 2010). Годовая продолжительность солнечного сияния в этих районах составляет 2000-2600 часов, суммарная солнечная радиация, приходящая на земную поверхность за год, – более 1100 кВт·ч/$м^2$.

Особо следует отметить высокий солнечный потенциал Якутии, в северных районах которой в апреле и мае месячные суммы суммарной солнечной радиации так же высоки, как на Северном Кавказе и в Астраханской области, – более 165 кВт·ч/м$^2$ (600 МДж/м$^2$). Карты распределения продолжительности солнечного сияния и суммарной солнечной радиации по территории России приведены в (Климатические факторы, 2010; Росгидромет, 2014).

Российская Федерация занимает первое место в мире по ветроэнергетическому потенциалу. Количество действующих ветровых электростанций с установленной мощностью от 0,1 до 210 МВт составляет 17. На Камчатке, в Чукотском АО, Якутии, Сахалинской области и Ямало-Ненецком АО действует семь изолированных систем. Проектируется и строится 14 ветровых электростанций (Постановление Правительства, 2009).

На многих территориях отмечается достаточный для эффективного развития ветроэнергетики потенциал, позволяющий электростанциям работать с годовым коэффициентом использования установленной мощности, превышающим 30% (IRENA, 2017). Для сравнения: в таких странах-лидерах ветроэнергетики, как Китай и Германия, он составляет 21,3 и 20,6% соответственно.

Эффективность работы ветроэнергетических установок напрямую зависит от средней скорости ветра. Наибольшим ветроэнергетическим потенциалом в России обладают берега Карского, Берингова и Охотского морей, где средние скорости на высоте 10 м над уровнем подстилающей поверхности составляют 7-8 м/с, а на высоте 100 м (высоте оси рабочего колеса ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения) – 10-12 м/с. На Европейской территории России перспективными для развертывания системной ветроэнергетики являются районы Кольского полуострова с высоким ветроэнергетическим потенциалом, прибрежные территории Белого моря, мелководья Финского залива, берега Ладожского озера, предгорья Северного Кавказа, прибрежная часть Каспия, междуречье Волги и Дона. На Азиатской территории России для ветроэнергетики перспективна южная часть Приморского края, особенно прибрежная зона залива Петра Великого. Весьма велики ветроэнергетические ресурсы на пологих склонах невысоких горных массивов Южного Урала. Как отмечено в (Росгидромет, 2014), за последние 20 лет XX столетия в России повторяемость «энергоактивных» скоростей ветра (≥ 5 м/с), то есть ветров, при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, мало изменилась по сравнению с предшествующими десятилетиями.

Кроме солнечных и ветровых ресурсов, в России имеются большие запасы энергии биомассы. Органическая биомасса признана одним из наиболее перспективных возобновляемых источников для удовлетворения потребности в электрической и тепловой энергии. Ее использование способствует значительному снижению экологической напряженности. В долгосрочной перспективе мировая биоэнергетика будет играть важную роль в низкоуглеродной энергетической системе. Прогнозируется, что вклад биоэнергетики в конечном общем потреблении энергии к 2060 году увеличится в 4 раза (Bioenergy power generation, 2018).

Энергия биомассы, в отличие от энергии других ВИЭ, может быть преобразована в жидкое топливо (биотопливо) и использоваться для

транспортных нужд. Сырьем для биотоплива являются отходы сельского и лесного хозяйства, отходы деревопереработки, торф, органические отходы, свалочный газ, посадки леса с коротким оборотом рубки, посадки рапса, злаков и бобовых культур, предназначенные для энергетических целей.

Значительным энергетическим потенциалом биомассы обладают юг Красноярского края, Иркутская, Тюменская, Томская, Свердловская, Читинская, Амурская, Вологодская, Архангельская, Кировская, Ленинградская области, Пермский и Хабаровский края, Республики Саха, Коми, Бурятия, Карелия.

Геотермальная энергия представляет собой естественное тепло планеты. Энергетические установки на основе тепла Земли (ГеоТЭС) используют высокую температуру воды или пароводяной смеси. По данным IRENA (IRENA, 2020), в 2018 году в мире работали 22 петротермальных электростанции, большая часть которых сосредоточена в Европе. К 2020 году выработка геотермальной энергии возросла незначительно: Турция увеличила мощность на 99 МВт, также некоторый прирост имел место в Новой Зеландии, США и Италии. Компания Rystad Energy опубликовала прогноз развития геотермальной энергетики на период до 2025 года. По ее данным, глобальные мощности геотермальных электростанций вырастут с 16 ГВт в конце 2020 года до 24 ГВт в 2025 году (https://www.c-o-k.ru/market_news/geotermalnaya-energetika-rastet). Установленная мощность геотермальных электростанций в мире составила 13 329 МВт, в России – 74 МВт (https://renen.ru/geothermal-energy-advantages-and-prospects). В России введены в эксплуатацию Паужетская (18 МВт), Верхне-Мутновская ГеоТЭС (12 МВт), полностью автоматизированная Мутновская ГеоТЭС мощностью 50 МВт и две ГеоТЭС на Курильских островах. Большие запасы подземных термальных вод находятся на Камчатке и Курильских островах, в Западно-Сибирском нефтегазоводоносном бассейне, в Дагестане, Чечне, Ингушетии, Северной Осетии, Ставропольском и Краснодарском краях.

В последнее время широкое распространение получило использование низкопотенциального тепла Земли на базе тепловых насосов, которые могут применяться в различных типах зданий и сооружений для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования (охлаждения) воздуха и др. (Росгидромет, 2014).

Возобновляемые источники энергии во многом зависят от климата, глобальное изменение которого будет воздействовать на их ресурсную базу, но природа и масштаб таких последствий точно не определены. Вопросу чувствительности возобновляемых источников к изменению климата посвящены различные исследования. Во многих работах отмечается, что изменение ресурсного потенциала солнечной, ветровой и биоэнергии будет носить преимущественно региональный характер, а на объем и географическое распределение геотермальных и океанических энергетических ресурсов изменение климата заметного воздействия не окажет (Клименко и др., 2019; Carvalho et al., 2017; Jerez et al., 2015; Peters, Buonassisi, 2019; Wild, 2015).

Изменение потенциала ветроэнергетических ресурсов и энергетического потенциала лесных ресурсов на период до 2070 года обсуждается в работе (Клименко и др., 2019). На основе расчетов по климатическим моделям CMIP5 в условиях сценария RCP 4.5 с применением авторской методики формирования модельных ансамблей получены оценки потенциала ВИЭ. Сделан вывод

об изменении скорости ветра в пределах от –15 до +10% на территории России ко второй половине XXI века по сравнению с началом столетия. Увеличение средней скорости ветра прогнозируется на юге Дальнего Востока, что будет способствовать повышению выработки энергии до 10-15%. Авторы не делают однозначного вывода об изменении скорости ветра на Чукотке и Камчатке, где предпринимаются попытки использовать ветроустановки в составе местных изолированных энергосистем, в связи с большим разбросом в модельных оценках. Полученные в цитируемой работе результаты достаточно хорошо согласуются с оценками по ансамблю моделей CMIP5, приведенными во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). Наибольшее различие отмечается в прибрежных северных районах Европейской части страны, особенно в районе Кольского полуострова, где прогнозируется не уменьшение, а заметный рост приземной скорости ветра (Росгидромет, 2014).

Существующие прогнозные оценки изменения ветрового режима отличаются некоторой противоречивостью и большой неопределенностью. Это связано с малыми изменениями скорости ветра по сравнению с естественной изменчивостью и большим межмодельным разбросом (Bloom et al., 2008; Breslow, Sailor, 2002; Jerez et al., 2015; Школьник и др., 2014).

Кроме оценки ветрового потенциала, авторами цитируемой работы ставилась задача рассчитать изменения объема пригодных для энергетического использования доступных древесных ресурсов, вызванные повышением биопродуктивности лесов за счет увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и изменения климатических условий. Сделан вывод о возможном увеличении энергетических ресурсов древесного топлива к середине столетия до девяти млн т.у.т., что по абсолютной величине значительно превышает климатические эффекты для других отраслей энергетики.

Многими исследователями обсуждаются вопросы влияния изменения климата на выработку энергии солнечными электростанциями (Peters, Buonassisi, 2019; Jerez et al., 2015; Feron et al., 2021; Wild, 2015).

В работе (Jerez et al., 2015) с помощью глобальных климатических моделей CMIP5 дана оценка будущих изменений в выработке солнечной генерации. Рассматриваются прогнозируемые потенциальные изменения солнечной радиации в ближайшие десятилетия в сочетании с ожидаемым изменением температуры. Делается вывод о том, что увеличение поступающей солнечной радиации компенсирует влияние температуры, и изменение климата вряд ли негативно скажется на развитии фотоэлектрических модулей в Европе.

Исследования возможных негативных последствий повышения глобальных температур для работы солнечных модулей (Peters, Buonassisi, 2019) показали, что кремниевые солнечные батареи могут потерять в среднем около 0,45% своей мощности на каждый градус глобального повышения температуры. Расчеты проводились на основе сценария RCP4.5. Глобальное потепление повлияет на солнечные модули по-разному. Некоторые солнечные батареи более устойчивы к высоким температурам, поскольку у них низкий температурный коэффициент максимальной выходной мощности. Полученные результаты указывают на необходимость исследований по снижению зависимости производительности фотоэлементов от температуры окружающей среды.

Энергетическая отдача фотоэлектрических систем в первую очередь зависит от доступного

количества солнечной радиации, поступающей на гелиоприемник. В работе (Wild, 2015) обсуждаются прогнозы долгосрочных изменений солнечной радиации на основе климатических моделей CMIP5 и их влияние на выработку энергии фотоэлектрических систем. Сделан качественный вывод о возможном снижении производства фотоэлектрической энергии во многих районах мира в ближайшие десятилетия в результате глобального потепления и уменьшения солнечной радиации. Положительные тенденции будут отмечаться только в регионах, где уменьшение количества облаков будет сопровождаться увеличением солнечной радиации. Это будет характерно для большей части Европы и юго-востока Китая.

В России, согласно модельному прогнозу CMIP6 в условиях сценария SSP4.5, в периоды 2021-2040, 2041-2060 и 2080-2099 гг. (Катцов и др., 2022), ожидается рост суммарной солнечной радиации по отношению к базовому периоду 1991-2010 гг. на Европейской территории страны и южной части Азиатской территории (рис. 2.3.5.6). В конце столетия максимальные значения положительной аномалии в отдельных районах Европейской территории и Западной Сибири могут достигать 6%. Интенсивность положительной аномалии будет снижаться в восточном направлении до 0-2%. В течение XXI века ожидается формирование обширных летних положительных аномалий в течение всего прогнозируемого периода. Снижение прихода радиации в зимний период практически на всей территории страны, а в весенний и осенний сезоны на Азиатской территории в общем годовом приходе проявится слабо.

В настоящее время и в близкой перспективе в России наиболее реальным направлением практического использования солнечной энергии является теплоснабжение. Как было отмечено во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), влияние изменений солнечной радиации и температуры воздуха положительно скажется на выработке тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами. Тенденция к увеличению выработки тепловой энергии подтверждается уточненными расчетами поступления солнечной радиации в соответствии со CMIP6 (рис. 2.3.5.7). Рост температуры воздуха в XXI веке будет способствовать увеличению выработки тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами в безморозный период, особенно в западных и южных районах России. Даже в северных и северо-восточных районах Азиатской территории страны рост температуры перекроет прогнозируемое уменьшение солнечной радиации, и использование солнечных коллекторов в режиме горячего водоснабжения может стать рентабельным.

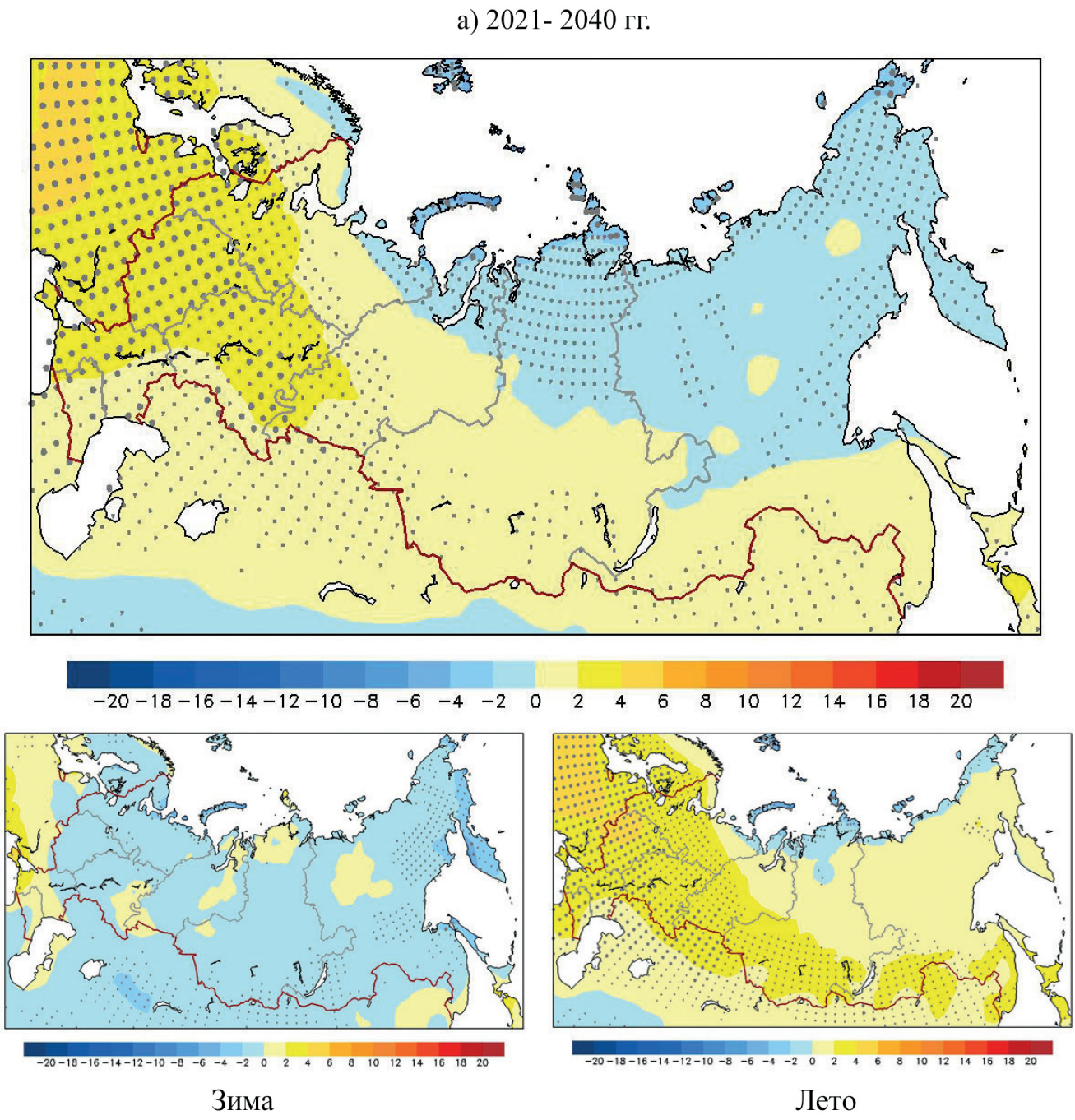
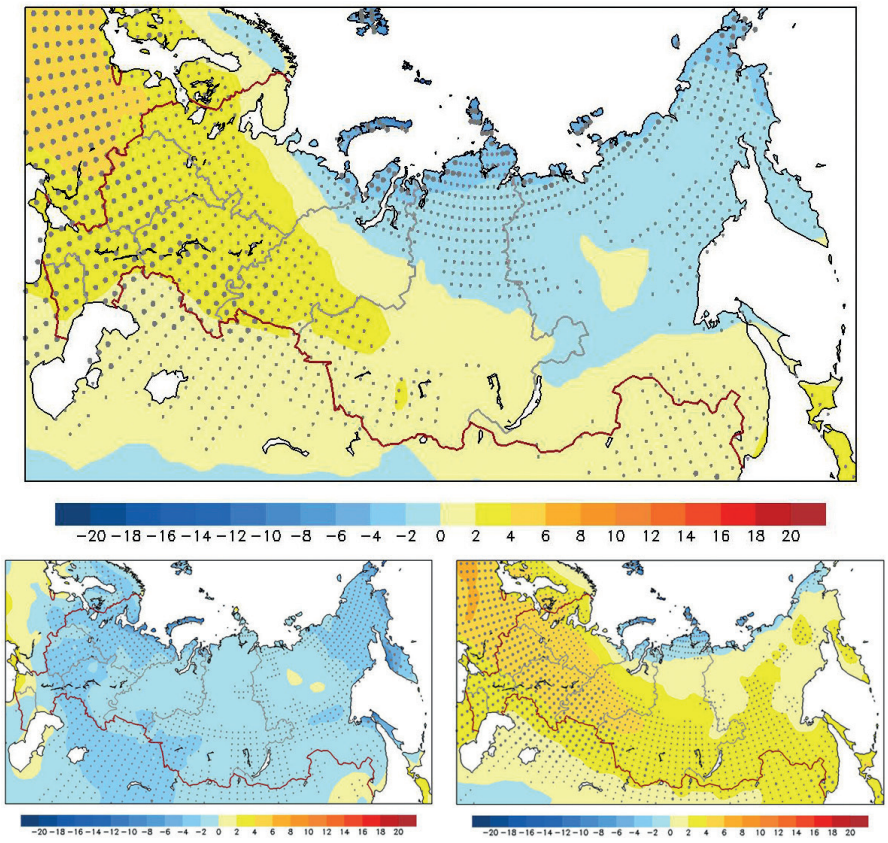



***Рис. 2.3.5.6*** *Изменения (%) годового и сезонного поступления суммарной солнечной радиации, рассчитанные по ансамблю моделей CMIP6 в условиях сценария SSP2-4.5 для 2021-2040 гг. (а), 2041-2060 гг. (б) и 2080-2099 гг. (в) по отношению к базовому периоду 1991-2010 гг.*

*Примечание. Малыми точками обозначены области, в которых 66% и более моделей показывают одинаковый знак изменения. Большими точками – 90% и более моделей показывают одинаковый знак изменения. Без точек – области, в которых менее 66% моделей дают изменения одного знака*

б) 2041- 2060 гг.




в) 2080- 2099 гг.

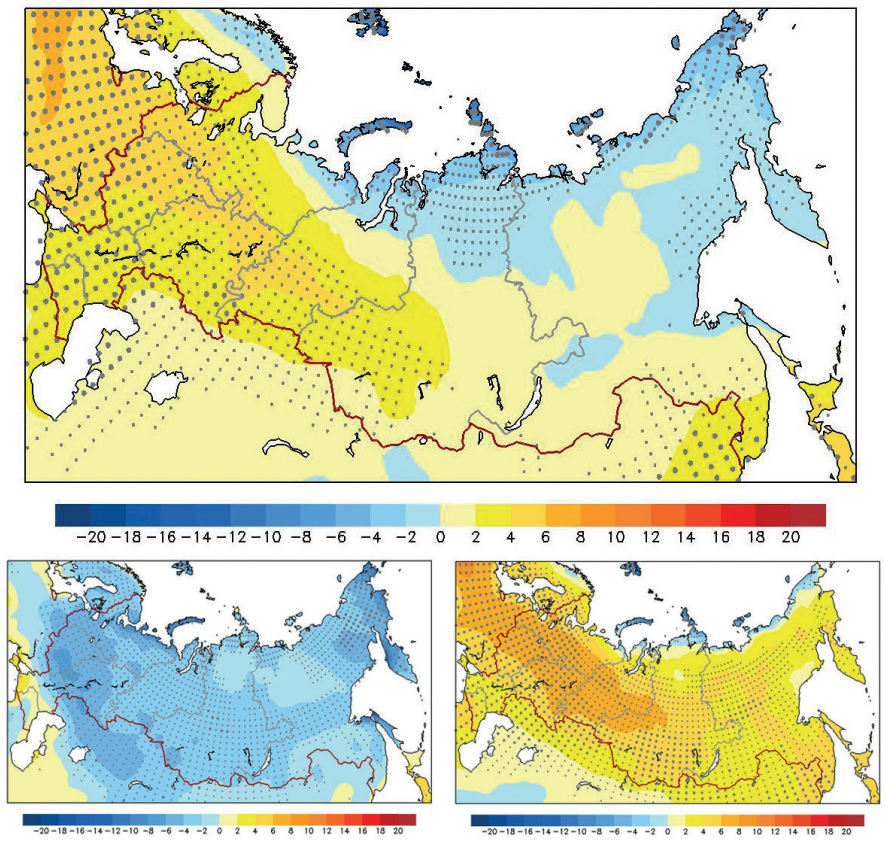



***Рис. 2.3.5.6*** *Продолжение*

Влияние происходящих изменений климата в связи с повышением температуры воздуха, увеличением количества осадков, повторяемости экстремальных явлений на ресурсный потенциал биомассы изучены недостаточно, и, вероятно, оно в разных регионах будет различным. Воздействие изменения климата на биомассу существует, но при повышении глобальной температуры не более чем на 2 °C, по сравнению с доиндустриальными наблюдениями, это воздействие будет ограничено (IPCC, 2011).

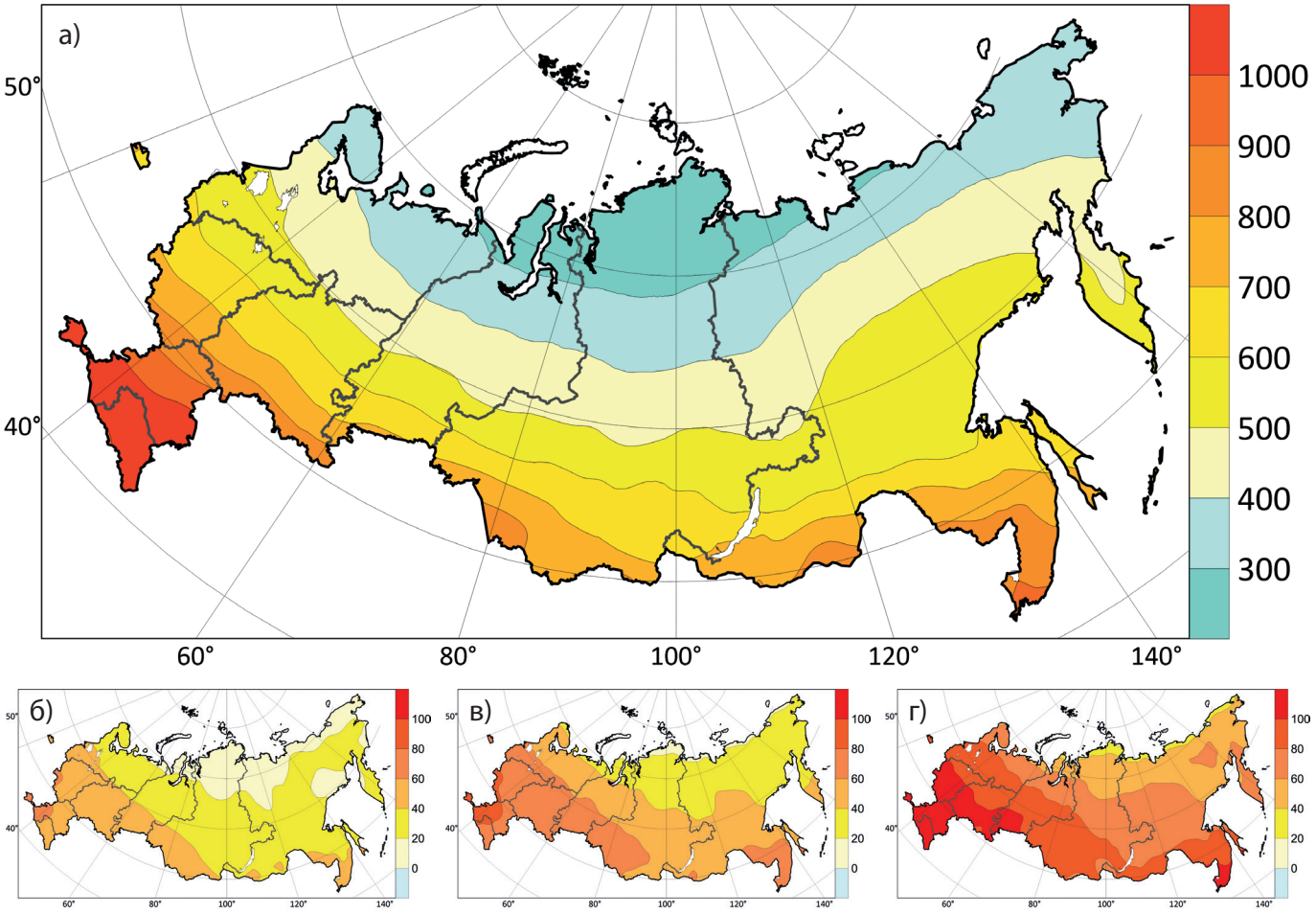



***Рис. 2.3.5.7*** *Удельная годовая выработка тепловой энергии плоским солнечным коллектором за базовый период 1991-2010 гг. (кВт•ч/м²) (а), ее изменения (кВт•ч/м²) для периодов:*
*2021-2040 гг. (б), 2041-2060 гг. (в) и 2080-2099 гг. (г) – по отношению к базовому периоду, рассчитанные по ансамблю моделей CMIP6 в условиях сценария SSP2-4.5*

На общий потенциал геотермальных ресурсов и эффективность использования геотермальной энергии изменение климата не будет иметь каких-либо серьезных воздействий (IPCC, 2011). Влияние ВИЭ на глобальный климат можно считать минимальным. Даже с учетом всего жизненного цикла – добычи сырья, производства компонентов, строительных и монтажных работ – электроэнергия от ВИЭ связана с выбросами $CO_2$ в атмосферу в 10-20 раз меньшими, чем электроэнергия из угля и газа. По мере развития технологий «углеродный след» от ВИЭ снижается. С другой стороны, куда более важной проблемой является «экологический след» от оборудования и компонентов солнечных и ветровых электростанций. Отрасль бурно развива-

ется, объемы производства быстро растут, а сами производственные мощности «мигрируют» из Европы и США в страны с менее строгой экологической политикой. Кремний, металлы платиновой группы, алюминий, сталь – все эти и другие необходимые для ВИЭ материалы добываются и обрабатываются с ущербом для окружающей среды. Задача мирового сообщества – управлять этими рисками, как того и требует концепция устойчивого развития ООН.

### 2.3.5.3 Передача электроэнергии

Линии электропередачи (ЛЭП) являются частью электрической сети и предназначены для передачи электроэнергии на большие расстояния. Различают воздушные и кабельные линии электропередач. Наиболее распространены воздушные линии, прокладка которых происходит на открытом воздухе с помощью высоковольтных кабелей, так как по сравнению с кабельными линиями они экономически более выгодны. Воздушные линии электропередачи особенно подвержены влиянию климатических воздействий из-за их территориальной протяженности. Согласно данным АО «СО ЕЭС», на 1 января 2021 года сетевое хозяйство единой энергетической системы (ЕЭС) России насчитывает более 13 000 линий электропередачи класса напряжения 110-1150 кВ общей протяженностью более 490 тыс. км и более 10 000 электрических подстанций 110-750 кВ. Из-за большой протяженности ЛЭП их подверженность неблагоприятным погодным воздействиям очень велика. Ливень со снегом, ураганный ветер, перепады температуры создают риски технологических нарушений в электросетевом распределительном комплексе (Доклад, 2017).

Аварии на ЛЭП приводят к большим экономическим потерям. В густонаселенных районах это может затронуть большое количество людей, а в изолированных и труднодоступных энергорайонах (Чукотский АО, Камчатская, Сахалинская и Магаданская области, центральная и северная части Якутии) последствия аварий для населения могут быть тяжелее, поскольку их устранение затруднительно.

В основе бесперебойного функционирования воздушных линий лежат климатические особенности района, в котором они эксплуатируются. В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ-7) указано, что при проектировании линий электропередач необходимо учитывать следующие климатические факторы:

- гололедная нагрузка,
- ветровая нагрузка,
- грозовая деятельность,
- температурные воздействия.

Воздушные линии электропередачи подвержены ветровому воздействию. Имеющиеся данные не дают основания говорить об увеличении ветровых нагрузок, поскольку анализ рядов наблюдений за скоростью ветра на метеорологических станциях показал слабо выраженную отрицательную тенденцию (Росгидромет, 2014). Однако следует принимать во внимание увеличение числа опасных явлений, связанных с ветровой нагрузкой (ураганами, штормами, смерчами и пр.), которое необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушных линий. Наибольшую опасность для возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера (в том числе нарушения электроснабжения) практически на всей территории Российской Федерации создают именно сильные ветры (Доклад, 2020). Ветровая нагрузка, действуя на обледенелый провод, создает результирующую гололедно-ветровую нагрузку, которая зависит от скорости ветра при гололеде и размеров отложения (Методические реко-

мендации, 2017). Под действием этой нагрузки провода скручиваются, вибрируют (начинается «пляска»), что уменьшает их прочность и может приводить к обрыву воздушных линий.

Грозы являются основной причиной отключения линий электропередачи. Грозовые перенапряжения на высоковольтных линиях возникают в результате прямого удара молнии в воздушные линии, что приводит к их временному обесточиванию. Полностью защитить воздушные линии от воздействия молниевых разрядов невозможно, поэтому при проектировании учитывается число возможных грозовых отключений. Интенсивность грозовой деятельности оценивается по числу дней с грозами и их продолжительности. В последние десятилетия положительного тренда грозовой активности не наблюдается, максимальные ее значения над северным полушарием отмечались в 1950-1960-е гг. (Росгидромет, 2014).

На работу воздушных линий влияет и температура воздуха, так как от нее зависит степень натяжения или провисания проводов. Сочетание низких температур воздуха с большими скоростями ветра создает дополнительную нагрузку на линии, приводят к их преждевременному износу и ослаблению узлов соединения (Гашо и др., 2018а, б).

Тепловые расчеты линий электропередачи важны при их проектировании и эксплуатации. Потери электрической энергии, пропускная способность электрических сетей зависят от температуры проводов, которая связана с температурой окружающей среды, скоростью ветра и солнечной радиацией. Климатические факторы и их изменения необходимо учитывать при прогнозировании возможной максимальной токовой нагрузки (Бигун и др., 2017).

Наблюдаемый рост температуры воздуха на территории России в целом негативно сказывается на функционировании линий электропередач. Увеличение числа суток с экстремально высокими значениями температуры воздуха в летний сезон (Катцов и др., 2020) отрицательно влияет на процесс передачи электроэнергии, приводит к уменьшению исходной передаваемой мощности. При повышении температуры воздуха до +25 °С передаваемая мощность уменьшается на 2,25%, на 1 °С, а при повышении температуры до +35 °С возникает опасность аварийных ситуаций при перегреве ЛЭП, что может вызвать прекращение передачи электроэнергии (Александров, 2006).

Повышение температуры воздуха в зимний период и увеличение случаев выпадения жидких осадков, в том числе переохлажденного дождя, приведут к росту рисков опасного гололедообразования и аварий на ЛЭП (Оценка, 2011).

Рост числа опасных и неблагоприятных явлений, таких как волны тепла и холода, сильные дожди, снегопады, гололедно-изморозевые отложения, сильные ветры, может привести к увеличению повторяемости аварий на ЛЭП (Доклад, 2020). Ожидается, что эта тенденция сохранится и даже усилится в XXI веке (IPCC, 2012). В целом на фоне возникающих экстремальных атмосферных нагрузок многие конструкции ЛЭП функционируют только благодаря запасу прочности, что влечет за собой высокую вероятность их разрушения (Росгидромет, 2014).

Воздушные линии электропередачи являются важнейшей частью энергетической системы России, поэтому необходимо повысить их устойчивость к возможным воздействиям климата. Важным мероприятием, направленным на предотвращение ущерба от ветровых

нагрузок, является вырубка деревьев вдоль ЛЭП. Расширение зоны вырубки деревьев позволит минимизировать ущерб, связанный с падением деревьев. Еще одной необходимой адаптационной мерой является выполнение регламентов по обслуживанию и эксплуатации элементов системы электроснабжения. Своевременная замена предаварийных опор и проводов не только повысит надежность ЛЭП, но и будет экономически выгодна, поскольку затраты на адаптацию не будут превышать прогнозируемые ущербы (Гашо и др., 2018а).

Также в условиях меняющегося климата важно своевременно уточнять и актуализировать карты климатического районирования, используемые при проектировании линий электропередачи. Основным нормативным документом при проектировании и эксплуатации ЛЭП является ПУЭ-7, в котором в качестве нормативной величины принята повторяемость климатических нагрузок один раз в 25 лет. Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE) и международная электротехническая комиссия (IEC) в своих документах (IEC 60826, CIGRE Brochure № 109) рекомендуют определять расчетные нагрузки на воздушные линии, исходя из требуемого уровня их надежности (для воздушных линий 220 кВ и ниже – один раз в 50 лет, для воздушных линий 330кВ и выше – один раз в 150 и 500 лет). С целью гармонизации российских и международных норм в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» разработаны методические указания по определению климатических нагрузок для задач проектирования воздушных линий и региональные карты климатического районирования, позволяющие определять климатические нагрузки с любой вероятностью непревышения (Луговой и др., 2014).

## Список литературы


**Акентьева Е. М., Тюсов Г. А., 2015:** Использование программного продукта ClimPACT для оценок воздействия климатических факторов на производство электроэнергии (на примере функционирования ТЭС и АЭС) // Труды ГГО. – Вып. 578. – С. 86-100.

**Александров Г. Н., 2006:** Режимы работы воздушных линий электропередачи. – СПб.: Центр подготовки кадров энергетики. – 139 с.

**Андреенко Т. И., Габдерахманова Т. С., Данилова О. В., Ермоленко Г. В., Киселева С. В., Колобаев М. А., Коломиец Ю. Г., Медведева Е. А., Нефедова Л. В., Попель О. С., Рафикова Ю. Ю., Фрид С. Е., Шакун В. П., 2015:** Атлас возобновляемых источников энергии в России. – СПб. – М. – 160 с.

**Бигун А. Я., Сидоров О. А., Осипов Д. С., Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Петрова Е. В., 2017:** Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи // Динамика систем, механизмов и машин. – Т. 5, № 1. – С. 8-17.

**Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А., 2018а:** Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы // Надежность и безопасность энергетики. – Т. 11, № 3. – С. 200-208.

**Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А., Началов А. В., 2018б:** Расчет ущербов электротехнического комплекса московского мегаполиса от опасных климатических изменений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – № 4. – С. 439-450.

**Гашо Е. Г., Пузаков В. С., Степанова М. В. 2015:** Резервы и приоритеты теплоэнергоснабжения российских городов в современных условиях / Материалы открытого семинара «Экономика энергетики», 26 мая 2015 г. – М.: ИНП РАН. – С. 3-92.

**Георгиевский М. В., Голованов О. Ф. 2019:** Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – Т. 64, Вып. 2. – С. 206-218.

**Дворецкая М. И., Жданова А. П., Лушников О. Г., Слива И. В., 2018:** Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России / Справочник. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 224 с.

**Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, 2017.** – СПб.: ООО «Астерион». – 106 с.

**Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации, 2020.** – СПб.: ООО «Астерион». – 120 с.

**Ермоленко Б. В., Ермоленко Г. В., Проскурякова Л. Н., 2017:** Насколько высок технически реализуемый потенциал ВИЭ в России? // ТЭК России. – № 9. – С. 23-27.

**Как разработать климатический план города? Опыт Москвы. 2017.** Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. Климатический форум городов России. – М. – 44 с.

**Калатузов В. А., 2014:** Натурные исследования градирен и систем технического водоснабжения // Промышленная энергетика. – № 10. – С. 25-31.

**Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2022:** Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды ГГО. – Вып. 604. – С. 5-54.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Климатические факторы возобновляемых источников энергии, 2010.** – СПб.: «Наука». – 234 с.

**Клименко В. В., Терешин А. Г., Федотова Е. В., 2019:** Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – Т. 25, № 3. – С. 6-27.

**Клименко В. В., Федотова Е. В., 2019:** Гидроэнергетика России в условиях глобальных изменений климата // Доклады Академии наук. – Т. 484, № 2. – С. 156-160.

**Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. В., 2015:** Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. – СПб.: «Издательство Кириллица». – 256 с.

**Луговой В. А., Тимашова Л. В., Черешнюк С. В., 2014:** Учет климатических нагрузок на воздушные линии электропередач // Энергия единой сети. – № 3 (14). – С. 30-40.

**Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство. Транспорт, 2017:** – СПб.: ООО «Астерион». – 159 с.

**Научно-прикладной справочник, 2017:** Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища Российской Федерации / Под редакцией В. Ю. Георгиевского. – СПб.: ГГИ. – 131 с.

**Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу, 2011 г. /** Катцов В. М, Порфирьев Б. Н. (ред.). – М: Росгидромет. – 251 с.

**Пивоварова З. И., Стадник В. В., 1988:** Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. – 291 с.

**Постановление Правительства Российской Федерации от 17.10.2009 № 823** «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики».

**Правила устройства электроустановок: 7 изд., 2003 г.** – утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 08.07.02: ввод. в действие с 01.01.03. – М: ОАО «ВНИИЭ», 2003.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Катцов В. М., Семенов С. М., ред. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Тюсов Г. А., Акентьева Е. М., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2017:** Оценки возможного влияния изменений климата России на функционирование объектов энергетики // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 47-57.

**Федоров М. П, Акентьева Е. М., Елистратов В. В., Масликов В. И., Сидоренко Г. И., 2017:** Водно-энергетические режимы гидроэлектростанций в условиях климатических изменений. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та. – 274 с.

**Школьник И. М., Мелешко В. П., Стадник В. В., Хлебникова Е. И., Акентьева Е. М., Генихович Е. Л., Киселев А. А., 2014.** Влияние изменений климата на производство и потребление энергии в России // Труды ГГО. – Вып. 573. – С. 92-222.

**Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.** Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. 79 с. https://minenergo.gov.ru/node/1026.

**Ahmad A., 2021:** Increase in frequency of nuclear power outages due to changing climate // Nature Energy, v. 6, pp. 755-762. https://doi.org/10.1038/s41560-021-00849-y

**Aivalioti S., 2015:** Electricity Sector adaptation to heat waves. Sabin Center for Climate Change Law // Columbia Law School Research Paper № 14-439, 44 p.

**Bioenergy power generation, 2018:** Tracking Clean Energy Progress.

**Bloom A., Kotroni V., Lagouvardos K., 2008:** Climate Change Impact of Wind Energy Availability in the Eastern Mediterranean Using the Regional Climate Model PRECIS // Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 8, pp. 1249-1257. https://doi.org/10.5194/nhess-8-1249-2008

**Breslow P. B., Sailor D. J., 2002:** Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States // Renewable Energy, v. 27, № 4, pp. 585-598.

**Carvalho D., Rocha A., Gómez-Gesteira M., Silva Santos C., 2017:** Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections // Renewable Energy, v. 101, pp. 29-40.

**Climate Adaptation and Resilience Plan 2021:** Report to the White House National Climate Task Force and Federal Chief Sustainability Officer. August 2021 – U. S. Department of Energy. 26 p. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/DOEClimateAdaptationandResiliencePlanSept21.pdf

**Ebinger J., Vergara W., 2011:** Climate Impacts on Energy Systems. Key Issues for Energy Sector Adaptation – The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 224 p.

**Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States, 2008:** // U. S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.5

**Feron S., Cordero R. R., Damiani, A., Jackson R. B., 2021:** Climate change extremes and photovoltaic power output // Nature Sustainability, v. 4, pp. 270-276. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00643-w

**IRENA, 2020:** Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi (Renewable capacity highlights, 31 March 2020). https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020

**IRENA, 2017:** REmap 2030 Renewable Energy Prospects for Russian Federation, Working paper, IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org/remap

**IPCC, 2011:** Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

**IPCC, 2012:** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. 582 pp.

**Jerez S., Tobin I., Vautard R., Montávez J. P., López-Romero J. M., Thais F., Bartok B., Christensen O. B., Colette A., Déqué M., Nikulin G., Kotlarski S., van Meijgaard E., Teichmann C., Wild M., 2015:** Nature Communications, v. 6, 10014 DOI: 10.1038 / ncomms10014.

**Peters I. M, Buonassisi T., 2019:** The Impact of Global Warming on Silicon PV Energy Yield in 2100: arXiv: 1908 00622[Phusics/soc-ph].

**Shepovalova O. V., 2015:** Energy saving, implementation of solar energy and other renewable energy sources for energy supply in rural areas of Russia // Energy Procedia, v. 74, pp. 1551-1560.

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, v. 50, № 1-2, pp. 215-230. DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6.

**Steininger K. W., König M., Bednar-Friedl B., Kranzl L., Loibl W., Prettenthaler F., 2015:** Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria – Springer International Publishing, Switzerland, 473 p.

**Totschnig G., Müller A., Hummel M., Hirner R., Nachtnebel H. P., Stanzel P., Schicker I., Formayer H., 2017:** Climate change impact and resilience in the electricity sector: The example of Austria and Germany // Energy policy, v. 103, pp. 238-248.

**Wild M., 2015:** Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems // Solar Energy, v. 116, pp. 12-24.

## 2.3.6 Транспорт

***Е. Н. Разова, С. А. Журавлев, В. Ю. Георгиевский***

Транспорт играет важную роль в структуре национальной и региональной экономики, и отказы в работе объектов транспортной инфраструктуры, связанные с негативными проявлениями изменения климата, вызывают неблагоприятные экономические и социальные последствия.

Изменение климата влияет на транспортные системы как напрямую (рост строительных затрат, эксплуатационных расходов, падение производительности), так и косвенно (изменения транспортных потоков, использование новых видов энергии, изменение структуры населенных пунктов). Прямые воздействия связаны с увеличением повторяемости экстремальных погодных явлений, повышением температуры воздуха, изменением количества осадков, таянием многолетней мерзлоты и др. Косвенные воздействия могут быть следствием как правительственных и экономических решений в рамках уменьшения выбросов $CO_2$ (сокращение числа трубопроводов и перевозок твердого топлива), так и социальных процессов (например, массовая миграция населения из засушливых или затопляемых районов, из арктических поселений, разрушаемых вследствие таяния многолетней мерзлоты), которые могут стать причиной пересмотра основных направлений транспортных потоков.

### 2.3.6.1 Наземный транспорт (автотранспорт и железнодорожный транспорт)

Наблюдаемые и ожидаемые климатические изменения температуры воздуха и режима увлажнения чаще оказывают негативное воздействие на состояние и функционирование наземной транспортной инфраструктуры. Даже сокращение продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха, которое должно было бы благоприятствовать работе транспорта (более высокие зимние температуры могут привести к повышению экономии топлива для транспортных средств и снижению требований к зимнему техническому обслуживанию), сопровождается частыми перепадами температуры, способствующими ускоренному разрушению покрытия автомобильных дорог. Особенно интенсивно процесс разрушения материалов происходит при частых переходах температуры воздуха через 0 °С. Увеличение количества жидких осадков, сопровождающих оттепели, является дополнительным фактором, усиливающим процесс разрушения, который сказывается на состоянии автодорог уже в настоящее время. По прогнозу к середине XXI столетия число дней с переходом через 0 °С увеличится до 10 случаев за сезон (рис. 2.3.7.5) в южных районах ЕТР, Средней Сибири, Дальнего Востока, Забайкалья и на прибрежных территориях Дальнего Востока (Катцов и др., 2020), что будет оказывать разрушающее воздействие на дорожные покрытия в этих регионах. Сокращение периода с отрицательными температурами приведет к уменьшению продолжительности зимнего ледостава арктических рек, снижению уровня прочностных характеристик льда и частому проявлению наледных водотоков на трассах автозимников, что ограничит движение по ним большегрузных машин (Егорова, 2016).

Наиболее сильные последствия изменения климата испытывают транспортные системы Арктики. Деградация (таяние) многолетней мерзлоты, уже сейчас наносящая ущерб авто-

мобильным и железным дорогам, будет и далее представлять риски для безопасности и потребует увеличения финансирования на техническое обслуживание транспорта на Севере. В последние годы также сократились эксплуатационные сроки и пропускная способность некоторых зимних (ледовых) дорог, что приведет к необходимости использования альтернативных методов доставки.

Исследования уязвимости транспортной инфраструктуры к изменению и изменчивости климата показали, что объекты ее более чувствительны к экстремальным погодным явлениям, некоторые из которых становятся все более интенсивными и частыми, чем к постепенным изменениям климатических параметров (Climate Change Impacts, 2020). Негативные последствия изменения климата для дорожно-транспортного комплекса связаны прежде всего с ростом числа опасных явлений, таких как сильная жара, сильные ливни и снегопады, снежные лавины, ураганные ветры (табл. 2.3.6.1).

***Таблица 2.3.6.1***

*Опасные метеорологические явления, влияющие на работу наземного транспорта и последствия, которые они вызывают (Стадник и др., 2020)*

| Опасные метеорологические явления | Последствия | |
|---|---|---|
| | Автомобильные дороги | Железные дороги |
| Продолжительные периоды с экстремально высокими температурами, частые переходы температуры воздуха через 0 °C | Размягчение асфальтового покрытия (износ шин, колейность), разрушение покрытия дорог, перегрев автомобилей, выход из строя транспортного оборудования, рост потребностей в охлаждении, сокращение интервалов между ремонтными работами, увеличение расходов на строительные и ремонтные работы | Деформация путей, пожары на откосах, задержки поездов из-за полных и частичных отказов в работе объектов инфраструктуры, подвижного состава, устройств сигнализации, централизации и блокировки, информации и связи |
| Интенсивные продолжительные осадки, ливни, паводки | Затопление дорог, учащение оползней, нарушение структурной целостности дорожного полотна, затруднение ремонтно-технического обслуживания дорог, мостов и дренажных систем, ухудшение видимости, задержки в движении | Незапланированные длительные перерывы в движении поездов из-за разрушения мостов, насыпей, размыва мостовых опор, затопления железнодорожного полотна, подтопления дренажных систем и туннелей, оползней и других деформаций земляного полотна, вызванных переувлажнением грунтов |

| Опасные метеорологические явления | Последствия | |
|---|---|---|
| | Автомобильные дороги | Железные дороги |
| Скорость ветра более 15 м/с | Разрушение ограждений, ДТП, снижение устойчивости транспортного средства | Повреждение объектов инфраструктуры, в том числе опор, разрывы контактных электрических проводов, скачки напряжения, незапланированные перерывы в движении поездов, препятствия на железнодорожной линии (например, упавшие линии электропередачи/деревья), опрокидывание порожних контейнеров при скоростях ветра > 20 м/с |
| Туманы | Снижение скорости движения в связи с ухудшением видимости | Снижение скорости движения в связи с ухудшением видимости, задержки поездов |
| Снег, метели | Снежные заносы, снижение пропускной способности дорог, отложение снега на проезжей части, образование снежного наката, снижение скорости движения, рост трудовых затрат на расчистку дорог | Нарушение графика движения поездов из-за непредвиденных работ по расчистке от снега путей и стрелочных переводов, сходы вагонов и поездов с рельсов из-за снежных заносов |

Прогнозируемый рост высоких (выше +30 °С) температур приведет к возникновению повышенных температурных деформаций и напряжений, размягчению асфальтового покрытия и быстрому ухудшению эксплуатационных качеств автодорог (Последствия, 2013; Хлебникова, Салль, 2012; Shao et al., 2017). Сухое и жаркое лето приводит к износу, проседанию дорожного покрытия автомобильных дорог, к снижению его рабочих характеристик и устойчивости. Для железнодорожного пути, особенно бесстыкового, при температуре воздуха более 25 °С требуется особенно тщательно следить за положением пути в плане, состоянием балластной призмы, подвижками плетей. Заметные отклонения пути в плане на длине 8-15 м, выявленные в период действия высоких температур, превышающих температуру закрепления плети на 15 °С и более, могут служить признаком начала его выброса (Последствия, 2013).

Интенсивные продолжительные осадки, ливни и связанные с ними паводки вызывают затопление дорог, учащение оползней, нарушение структурной целостности дорожного полотна, затруднение ремонтно-технического обслуживания дорог, мостов и дренажных систем. Увеличение количества осадков и их суточных

максимумов в зимний сезон повлекут за собой необходимость принятия дополнительных мер по организации движения и росту эксплуатационных расходов на содержание дорог (Хлебникова и др., 2019б). Рост повторяемости экстремальных осадков негативно скажется на состоянии железнодорожной инфраструктуры из-за повышения опасности подмыва мостовых конструкций, снижения устойчивости откосов и активизации оползневых процессов в насыпях.

Большие скорости ветра (более 15 м/с) вызывают разрушение ограждений, разрывы электросетей. На железной дороге при скоростях ветра более 20 м/с возможно опрокидывание порожних контейнеров с платформ (Болондова и др., 2019). Срыв груза с железнодорожных платформ может привести к повреждению объектов за пределами путей и создать угрозу столкновения других поездов с сорвавшимися контейнерами.

За период с 1992 до 2017 г. воздействие природных факторов в качестве основной причины аварии было указано для 20% дорожно-транспортных происшествий и нарушений дорожного движения (Петрова, 2018). Очень высокий уровень риска характерен для Красноярского, Краснодарского и Хабаровского краев, Сахалинской области, высокий уровень – для Алтайского, Камчатского и Приморского краев, Оренбургской, Магаданской и Мурманской областей. Основными причинами аварий на железнодорожном транспорте стали повреждения железнодорожных путей в результате снежных заносов и ливневых паводков, схода оползней, селевых потоков, снежных лавин, деформации рельсов из-за сильной жары, падения деревьев на пути при сильном ветре.

Указанные виды опасных явлений сказываются преимущественно на инфраструктуре наземного транспорта. Безопасность дорожного движения во многом определяют явления погоды: туман, метель, пыльные бури, осадки, гололедица, гололед и др. Наибольшую опасность представляют снегопады, при которых количество выпавших осадков превышает 20 см за 12 ч и менее.

В последние годы исследований опасных природных явлений становится все больше и оценке повторяемости атмосферных явлений в литературе уделяется много внимания. Однако, как правило, анализируется только повторяемость в текущем периоде (Атлас, 2012; Бадахова и др., 2018; Коршунов и др., 2018; Самодурова, 2008). Прогноз ряда специализированных показателей для транспорта включает построение различных зависимостей между климатическими характеристиками. Например, число дней с обледенением автодорог в середине XXI века получено с учетом зависимости числа дней с гололедом от определенных сочетаний температуры и влажности воздуха, а также дней с осадками (Кобышева и др., 2015).

Для разработки стратегии адаптации транспортной отрасли к изменениям климата, необходимы сценарные прогнозы, т.к. объекты транспортной инфраструктуры проектируют на срок от 30 до 100 лет (Последствия, 2013). На основе массовых ансамблевых расчетов с системой моделей высокого разрешения (Школьник, Ефимов, 2015) выполнены модельные оценки будущих изменений прикладных показателей редких температурных экстремумов (Хлебникова и др., 2019а) и экстремумов количества и интенсивности осадков (Хлебникова и др., 2019б), а также получены вероятностные характеристики изменения специализирован-

ных климатических показателей, влияющих на функционирование транспортной инфраструктуры (Катцов и др. 2020).

### 2.3.6.2 Трубопроводный транспорт

Протяженность магистральных трубопроводов России составляет 217 тыс. км, в том числе 151 тыс. км газопроводных, 46,7 тыс. км нефтепроводных, 19,3 тыс. км нефтепродуктопроводных магистралей. По магистральным трубопроводам перемещается 100% добываемого газа, 99% нефти, более 50% продукции нефтепереработки. В общем объеме грузооборота трубопроводного транспорта доля газа составляет 55,4, нефти – 40,3, нефтепродуктов – 4,3% (Чернокульский и др., 2018).

Безопасность системы транспортировки нефти и газа зависит от климатических условий и чрезвычайно чувствительна к их изменениям, прежде всего температуры воздуха и осадков. Наиболее опасные последствия вызваны деградацией многолетней мерзлоты в зоне сезонного промерзания грунтов, поскольку зона многолетней мерзлоты занимает около 63% территории России (10,7 млн км$^2$), на которой сосредоточено более 80% разведанных запасов нефти и около 70% природного газа (Власова, 2017). Изменение климата вызывает увеличение температуры многолетних мерзлых грунтов, уменьшение их прочности и интенсификацию ряда деструктивных геокриологических процессов, таких как термокарст, солифлюкция, неравномерные просадки почвы и тому подобное. За последние годы число сооружений, получивших повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось, по сравнению с предшествующим десятилетием, в Норильске – на 42, Якутске – на 61, Амдерме – на 90% (Нефедова, 2020).

Повышение температуры воздуха сказывается на эксплуатации трубопроводов, влияя на их линейные части и на площадные объекты (компрессорные станции). Например, изменение температуры воздуха влияет на подачу газа, т.к. гарантированная мощность турбин на компрессорных станциях рассчитана на температуру не более +15 °C и при превышении этого порога давление в газопроводе становится недостаточным (тренд за период 1966-2020 гг. числа дней с температурой выше 15 °C составляет от одного дня на юге до трех дней на севере за десятилетие на всей территории протяженности трубопроводов).

Рост значительных температурных перепадов также является причиной отказа промысловых трубопроводов. Большое число аварий происходит летом, когда перепады температур по сечению трубы могут достигать 10 °C и возникают локальные напряжения, значительно превышающие предел прочности труб (Акимов и др., 2016). Важным фактором, определяющим аварийность эксплуатации трубопроводов, является увеличение количества и интенсивности осадков. Анализ причин аварийности на трубопроводах показал (Росгидромет, 2014), что наиболее часто аварии происходили на фоне избыточного увлажнения грунта, вызывающего: повышение коррозионной активности грунтов (при увеличении их влажности до определенного уровня); чередование грунтов с различной влажностью и, как следствие, неравномерной электрической проводимостью, приводящей к появлению участков с недостаточной защитой от коррозии; возникновение в трубопроводе напряжений, превышающих расчетные, по причине пучения водонасыщенных грунтов и т.д.

С осадками связаны и оползни, а оползневые процессы выступают в роли основной причины аварий: в подземных трубопроводах подвижки на оползневых склонах вызывают значительные напряжения и деформации, возникающие при изгибе, а на надземных переходах происходит смещение опор с провисанием трубопровода (Власова, 2017).

Селевые процессы также представляют опасность для газопроводов, расположенных в предгорной зоне. Причинами возникновения селя часто являются: интенсивные и продолжительные ливни, быстрое таяние снега и ледников, прорыв горных озер – т.е. процессы, являющиеся следствием потепления климата.

Увеличение среднегодовых, летне-осенних и зимних расходов воды усиливает вероятность досрочного размыва магистральных трубопроводов на подводных переходах через реки по двум причинам:

– из-за увеличения времени размыва русла – вместо 3-4 месяцев в половодье, когда обычно деформации максимальны, время размыва удлиняется до 10-12 месяцев, включающих период летне-осенней и зимней межени;

– из-за более раннего наступления фактического срока критического размыва трубопроводов по сравнению с проектным расчетным сроком, при определении которого климатическая составляющая не учитывалась (Доклад о климатических рисках, 2017).

Таким образом, для минимизации потерь, возникающих при эксплуатации трубопроводного транспорта, необходим детальный анализ рисков, обусловленных наблюдаемыми и ожидаемыми в будущем климатическими изменениями.

### 2.3.6.3 Водный транспорт

В 2020 году на долю внутреннего водного транспорта приходилось 1,4% общего объема перевозок грузов, а на грузооборот – 1,3%. В 2020 году по отношению к 1989 году объем перевозок пассажиров снизился в 13,5 раза (с 103 до 7,6 млн человек), а по отношению к 2019 году – на 40% (Транспорт России, 2021). Последствия изменения климата, вызванные подъемом температуры, изменением режима осадков и повышением уровня моря, окажут значительное влияние на внутреннее судоходство (табл. 2.3.6.2). Влияние погодных факторов на внутреннее судоходство сводится главным образом к следующему: засухи вызывают снижение уровня воды и скорости течения, что может создавать неадекватные условия для навигации и приводить к росту числа аварий (посадок на мель) и увеличению потребления топлива; половодья приводят к приостановке судоходства, изменениям в режимах и морфологии процессов осадкообразования в реках и повреждениям береговых дорог, самих берегов и противопаводковых сооружений; ледостав вызывает приостановку судоходства. Ледовые явления и процессы приводят к нарушению условий эксплуатации различных объектов (водозаборов, дорог, мостовых переходов и пр.), к повреждению гидротехнических сооружений, ограничивают сроки судоходства на реках.

***Таблица 2.3.6.2***

*Факторы и последствия влияния изменения климата для внутреннего судоходства (Moser et al., 2008)*

| Фактор | Влияние | воздействие на | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | реки, каналы, протоки, озера | шлюзы, плотины, инфраструктура | оперативный контроль | суда |
| Увеличение количества и интенсивности осадков, рост числа экстремальных наводнений | увеличенный уровень воды и скорости течения | + | + | + | + |
| | изменения в процессах отложения (разрушение набережных, локальные размывы, деградация берегов) | + | + | + | |
| | маневренность | | + | | + |
| | увеличенная нагрузка на инфраструктуру | | + | | |
| | уменьшение доступных земель для развития | | + | + | |
| | снижение регулярности работы порта | | + | + | |
| | снижение способности природных ресурсов к восстановлению | + | | | |
| Уменьшение количества осадков, увеличение количества экстремальных засух | уменьшение уровня воды и скорости течения | + | + | + | + |
| | снижение регулярности работы порта | | + | + | |
| | изменения в процессах отложения (разрушение набережных, локальные размывы, деградация берегов) | + | + | + | |
| | снижение способности природных ресурсов к восстановлению | + | | | |

| Фактор | Влияние | воздействие на | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | реки, каналы, протоки, озера | шлюзы, плотины, инфраструктура | оперативный контроль | суда |
| Изменения соотношения сумм осадков разных видов (жидкие, твердые, смешанные) по сезонам | изменения продолжительности сезонов высокой и низкой воды | + | + | + | + |
| | изменения в процессах отложения (локальные размывы, места намывов и разрушений) | + | + | + | + |
| Увеличение температуры воздуха и воды | изменения в процессах отложения (разрушение набережных, локальные размывы, деградация берегов) | + | | | |
| Изменения ледового состояния | увеличение сроков навигации | + | + | + | + |
| | изменения в расположении ледяных заторов | + | + | + | |

В соответствии с прогнозом изменения слоя стока (Росгидромет, 2014), можно утверждать, что к середине XXI века слой стока может уменьшиться на 0,7-1,3%. При потеплении климата на водосборе рек совместный эффект роста количества зимних осадков и интенсификации таяния снежного покрова будет проявляться в увеличении стока зимой. В то же время, в оставшуюся часть года сток показывает тенденцию к уменьшению. В целом в бассейне многих российских рек будет наблюдаться стагнация и даже спад слоя стока, что приведет к изменению гидрологических характеристик, важных для судоходства.

Значимая социальная роль внутреннего водного транспорта сохраняется в регионах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. К концу XXI века для рек севера ЕТР ожидается уменьшение числа дней с ледовым покровом или ледовыми явлениями по сравнению с периодом 1986-2005 гг. на 80 или более дней, для центра Восточной Сибири – на 30 дней. Для всех без исключения исследованных рек ожидается сокращение максимальной толщины льда (Agafonova et al., 2017). Для абсолютного большинства рек Западной и Восточной Сибири за период 1980-2014 гг. число дней с ледовым покровом было на 10-15 дней меньше, чем за период 1955-1979 гг., в бассейне Амура – меньше на 15-20 дней. Помимо уменьшения продолжительности периода с ледовыми явлениями, отмечается наличие трендов на снижение мак-

симальной толщины льда до 5-10 см/десятилетие. Сохранение этой тенденции до середины XXI века будет способствовать развитию здесь речного судоходного транспорта вследствие увеличения времени навигации (Vuglinsky, Valatin, 2018).

### 2.3.6.4 Воздушный транспорт

В настоящее время различают крупномасштабные, мелкомасштабные и микромасштабные воздействия на авиацию, связанные с изменением климата (Climate Change Impacts, 2016).
Вопросы влияния крупномасштабных воздействий рассматривались МГЭИК (2014). Среди причин таких воздействий были названы:

- увеличение повторяемости высоких температур воздуха,
- усиление штормов,
- увеличение количества осадков,
- подъем уровня моря, угрожающий инфраструктуре аэропортов, расположенных на побережьях на небольшой высоте над уровнем моря.

Рост температуры воздуха в сочетании с повышенными значениями удельной влажности может значительно повлиять на максимально допустимую взлетную массу самолета, изменяя плотность воздуха на поверхности и, следовательно, подъемную силу, создаваемую при заданной скорости. Для длины взлетно-посадочной полосы и типа воздушного судна существует температурный порог, при превышении которого самолет не может взлететь с максимальной массой и, следовательно, вынужден иметь ограничение по весу, особенно в аэропортах с короткими взлетно-посадочными полосами (Climate Change Impacts, 2016).

Что касается мелкомасштабных локальных воздействий, то они связаны с такими метеорологическими явлениями, как конвекция, низкоуровневый сдвиг ветра, град, удары молний, турбулентность при ясном небе. Турбулентность при ясном небе является причиной большинства авиационных происшествий, связанных с погодой. В (He et al., 2020) показано, что при возрастании концентрации углекислого газа в атмосфере на 50% турбулентность при ясном небе в пределах трансатлантического перелета возрастает на 10-40%. Турбулентность связана с атмосферными струйными течениями, которые, по прогнозам, будут усилены антропогенным изменением климата, т.к. струйное течение в средних широтах в обоих полушариях возникает и поддерживается за счет разности температур между холодными полярными районами и теплыми тропиками. Эта разность уменьшается на поверхности из-за потепления полярных районов, но возрастает на крейсерской высоте полета из-за охлаждения нижней стратосферы. Изменения в преобладающих характеристиках струйных течений могут повлиять на оптимальные маршруты полетов, их продолжительность и расход топлива.

Помимо указанных воздействий на функционирование самолета, все рассмотренные в предыдущих разделах явления влияют и на наземную инфраструктуру аэропортов. Ливневые осадки и усиление штормовой деятельности приводят к разрушению объектов инфраструктуры. Уже сейчас в России иногда закрываются аэропорты в связи с затоплением взлетной полосы. Возможное возрастание повторяемости опасных явлений, таких как ураганные ветры, туман, град, песчаные бури, может увеличить число задержек и отмен полетов, связанных с погодными условиями. Надежность авиатранспортной системы во многом зависит от характеристик средств связи и навигации в системе воздушного пространства, а эти объекты подвержены от-

ключениям из-за атмосферных явлений, таких, например, как молнии (Coffel, Horton, 2015).

### 2.3.6.5 Адаптация транспортных систем

Адаптационные меры должны понизить степень уязвимости и повысить устойчивость и жизнеспособность транспортных систем к изменению климата. Под устойчивостью понимается способность системы сохранять свои базовые функции по обеспечению перевозок, несмотря на негативные природные явления. Применительно к транспорту жизнеспособность означает не только физическую надежность и долговечность инфраструктуры, но и способность транспортной системы быстро и с минимальными затратами восстанавливаться в случае возникновения аварийной ситуации.

Адаптационные меры для транспорта должны включать: изучение влияния климатических изменений на транспортную инфраструктуру, пересмотр технических стандартов для строительства, обслуживания и эксплуатации транспортных сетей (инфраструктуры и оборудования), разработку методики оценки рисков и уязвимости инфраструктуры и систем наземного, морского и воздушного транспорта.

Адаптация транспортной инфраструктуры к изменениям климата сложна, поскольку транспортные сети отличаются большой протяженностью магистралей и, следовательно, разнообразием не только климатических, но и ландшафтных условий (горные районы, прибрежные равнины, леса, степи и т.д.). В связи с этим разработка адаптационных мер должна проводиться не только на национальном, но и на региональном уровне и даже на местном, т.к. необходим учет состояния инфраструктуры (физическое состояние, методы обслуживания и т.п.).

## Список литературы


**Акимов В. А., Дурнев Р. А., Соколов Ю. И., 2016:** Защита населения и территорий Российской Федерации в условиях изменения климата. МЧС России / Глава 6. Воздействие изменений климата на отрасли экономики и регионы страны. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России. – С. 187-230.

**Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций, 2012:** Под ред. С. К. Шойгу. – М.: «Феория». – 718 с.

**Бадахова Г. Х., Лашманов Ю. К., Шмигельский В. А., 2018:** Динамика и современный режим грозовой активности над центральным Предкавказьем // Наука. Инновации. Технологии. – № 4. – С. 117-130. DOI 10.37495/2308-4758-2018-4-117-130.

**Боландова Ю. К., Попов В. Г., Сухов Ф. И., Матешева А. В., 2019:** Условия опрокидывания порожних контейнеров под воздействием ветровых нагрузок // Мир транспорта. – № 6. – С. 50-61.

**Власова Л. В., 2017:** Оценка влияния природных воздействий в задачах обеспечения надежной и безопасной эксплуатации газотранспортной системы ПАО «Газпром» // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – № 1 (29). – С. 49-56.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, 2017:** – СПб.: ООО «Амирит». – 106 с.

**Егорова Т. П., 2016:** Влияние климатических изменений на функционирование транспортной системы в Арктических районах Якутии. Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера – 2016 / Материалы Пятого Всероссийского научного семинара: в 2 частях, Сыктывкар, 21-23 сентября 2016 года. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография. – С. 147-151.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. В., 2015:** Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. – СПб.: «Издательство Кириллица». – 256 с.

**Коршунов А. А., Рыбанова А. Ю., Фокичева А. А., Шаймарданов М. З., 2018:** Анализ интенсивности воздействий опасных условий погоды на социально-экономическую систему // Ученые записки Российского гидрометеорологического института. – № 53. – С. 18-33.

**МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.:** Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р. К. Пачаури, Л. А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, – Женева, Швейцария. – 163 с. http://ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf

**Нефедова Л., 2020:** Адаптация энергокомплекса к изменениям климата в Арктике // Энергетическая политика, № 9 (151), с. 92-103. https://energypolicy.ru/l-nefedova-adaptacziyahttps://energypolicy.ru/l-nefedova-adaptacziya-energokompleks/energetika/2020/16/10/energokompleks/energetika/2020/16/10/

**Петрова Е. Г., 2018:** Оценка опасных природных воздействий на объекты транспортной инфраструктуры. В сборнике: Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата «ГЕОРИСК – 2018» / Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков. Том 2. – С. 112-116.

**Последствия изменения климата для международных транспортных сетей и адаптация к ним.** Доклад группы экспертов. Организация Объединенных Наций. – Нью-Йорк, Женева, 2013. – 270 с. https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014r. pdf

**Самодурова Т. В., 2008:** Физико-статистические модели для прогноза образования зимней скользкости на дорожных покрытиях // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – № 1. – С. 126-129.

**Стадник В. В., Клюева М. В, Задворных В. А., Самойлова Е. П., 2020:** Влияние наблюдаемых изменений климата на транспортную отрасль экономики (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды ГГО. – Вып. 599. – С. 7-25.

**Транспорт России, 2021:** Информационно-статистический бюллетень январь –декабрь 2020 года. – М.: Министерство транспорта Российской Федерации. – 110 с.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019а:** Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 11-23.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М., 2019б:** Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 5-16.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2012:** Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в первой половине века // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 84-126.

**Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А., Салль И. А., 2014:** Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // Труды ГГО. – Вып. 574. – С. 125-178.

**Чернокульский А. В., Козлов Ф. А., Золина О. Г., Булыгина О. Н., Семенов В. А., 2018:** Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 5-18.

**Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015:** Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – Вып. 576. – С. 201-211.

**Agafonova S. A., Frolova N. A., Surkova G. V., Koltermann K. P., 2017:** Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century // Geography, environment, sustainability, v. 10, № 4, pp. 4-15.

**Climate change impacts on aviation, 2016:** An interview with Herbert Puempel – WMO Secretariat Bulletin, v. 65 (2). https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/climate-change-impacts-aviationinterview-herbert-puempel

**Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes, 2020:** Report of United Nations Economic Commission for Europe (ECE), 216 p. https://unece.org/transport/publications/climate-change-impacts-and-adaptationhttps://unece.org/transport/publications/climate-change-impacts-and-adaptation-international-transport-networks-0international-transport-networks-0

**Coffel E., Horton R., 2015:** Climate Change and the Impact of Extreme Temperatures on Aviation // Weather, Climate, and Society, v.7, № 1, pp. 94-102.

**He Y., Lindbergh S., Graves C., Rakas J., 2020:** Airport Exposure to Lightning Strike Hazard in the Contiguous United States // Risk Analysis. 22 p., DOI: 10.1111/risa.13630

**Moser H., Hawkes P., Arntsen Ø., Gaufres P., Mai S., White K., 2008:** Impacts of Climate Change on Navigation. DOI: 10.13140/2.1.4174.7202.

**Shao Z., Jenkins G., Oh E., 2017:** Assessing the impacts of climate change on road infrastructure // International Journal of GEOMATE, v. 13, № 38, pp. 120-128. DOI: 10.21660/2017.38.72099.

**Vuglinsky V., Valatin D., 2018:** Changes in ice cover duration and maximum ice thickness for rivers and lakes in the Asian part of Russia // Natural Resources, № 9, pp.73-87.

### 2.3.7 Строительство и жилищно-коммунальное хозяйство

*Е. И. Хлебникова, Ю. Л. Рудакова*

Строительный сектор экономики вносит заметный вклад в суммарный выброс парниковых газов – как в российском, так и в глобальном масштабе. В настоящее время серьезные усилия специалистов отрасли направлены на улучшение показателей, отвечающих политике энергосбережения и смягчения изменений климата. Одновременно отрасль сталкивается с рисками, связанными с ожидаемыми воздействиями климатических изменений, которые могут иметь существенные финансовые последствия.

Во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) нашли отражение позитивные и негативные эффекты воздействия климатических изменений на состояние зданий и сооружений, а также функционирование отрасли в целом. Приведенные в докладе (Росгидромет, 2014) количественные оценки будущих изменений специализированных климатических показателей были получены преимущественно на основе результатов расчетов с помощью глобальных климатических моделей поколения CMIP5 (Павлова и др., 2014) и в меньшей степени региональной климатической модели (Школьник и др., 2012). В последнее десятилетие в мире и в России интенсивно велись работы, направленные на развитие технологий моделирования, предоставляющих потребителям лучшие прикладные возможности для анализа климатических рисков. Оценки, представленные в настоящем разделе, базируются на использовании технологии сценарного прогнозирования регионального климата, обеспечивающей проведение массовых ансамблевых расчетов для всей территории России с последующей вероятностной интерпретацией полученных оценок. Центральным компонентом этой технологии является региональная климатическая модель (Школьник, Ефимов, 2015), имеющая горизонтальное разрешение 25 км. Описание данной технологии климатического прогнозирования и некоторые результаты ее применения нашли отражение в (Катцов и др., 2017; Shkolnik et al., 2018; Хлебникова и др., 2019а, б; Катцов и др., 2020) и других работах.

Как отмечалось в Пятом оценочном докладе МГЭИК (Chalmers, 2014), можно выделить следующие виды воздействий на строительную отрасль, связанных с наблюдаемыми и ожидаемыми изменениями климата, которые могут привести к заметным финансовым последствиям: 1) изменение условий проведения строительных работ и соответствующее изменение затрат; 2) физические риски, обусловленные несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям; 3) изменение спроса на восстановление и ремонт зданий и сооружений в связи с увеличением числа опасных явлений (этот вид воздействий еще предстоит оценить в будущем). Первые две группы воздействий отчетливо просматриваются на территории России.

#### 2.3.7.1 Организация и проведение строительных работ

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно влияют на условия организации и проведения работ. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже -30 °С уменьшит простои в работе и положительно отразится на работоспособности оборудования. Уменьшение длительности периода и градусо-дней с отрицательной температурой воздуха (рис. 2.3.7.1) приведет к увеличе-

нию продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ. При этом уменьшится необходимость использования противоморозных добавок, что повысит качество бетонных работ и положительно скажется на долговечности монолитных железобетонных конструкций, особенно в западных регионах ЕТР и в Западной Сибири.

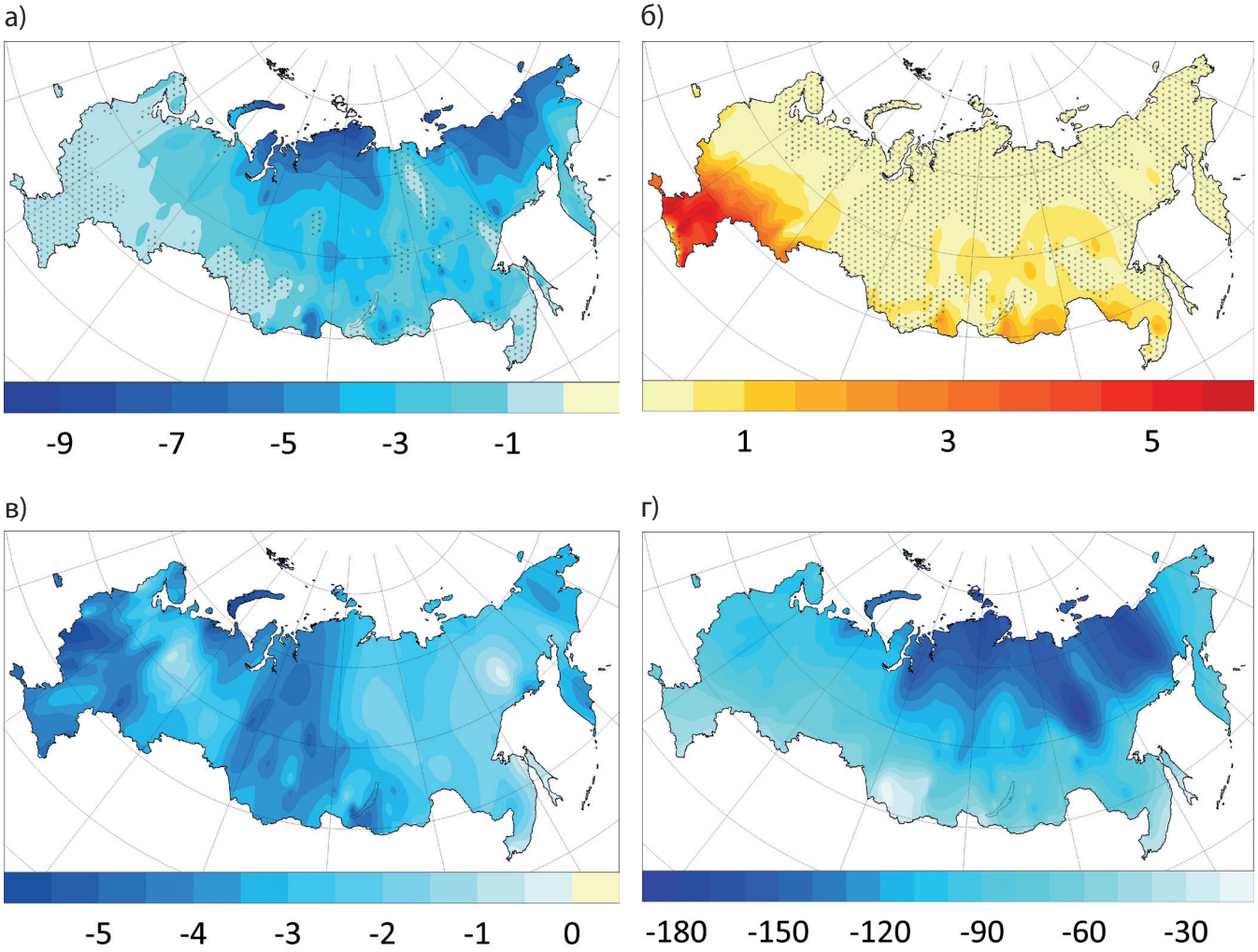



***Рис. 2.3.7.1*** *Скорость изменения пороговых характеристик температуры воздуха по данным наблюдений на интервале 1961-2020 гг.: а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (дни/10 лет), б) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С (дни/10 лет), в) продолжительность периода с отрицательной температурой воздуха (дни/10 лет), г) градусо-сутки периода с отрицательной температурой воздуха (°С•сут/10 лет)*

*Пояснение: здесь и далее приведены результаты анализа трендов с использованием непараметрического метода Манна – Кендалла; мелкими точками выделены области с критическим уровнем значимости выше 10%*

Вместе с тем происходящее потепление вызывает усиление тенденций, являющихся – с точки зрения проведения строительных работ – неблагоприятными. Прежде всего это относится к режиму увлажнения. На всей территории России ожидается увеличение количества осадков,

при этом существенно изменится их интенсивность (см. пункт 2.3.7.6). Выпадение сильных осадков влияет на стоимость строительства из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов, обезвоживания фундаментов и пр.

Важно также учитывать ухудшение условий проведения строительных работ в летний период в связи с ростом числа дней с высокой температурой воздуха в южных частях страны (рис. 2.3.7.1). Необходимые мероприятия по охране труда работников могут привести к увеличению сроков реализации проектов (в частности, связанных с дорожным строительством) и их стоимости.

### 2.3.7.2 Ограждающие конструкции и тепловая защита зданий

Стандарты проектирования, имеющие отношение к тепловой защите зданий, претерпевали в последние десятилетия существенные изменения. В наибольшей степени эти изменения были обусловлены необходимостью уменьшения антропогенного влияния на климат и последовавшего ужесточения требований к энергоэффективности зданий. Согласно действующим нормативным документам, проектирование зданий и сооружений должно осуществляться с учетом требований к ограждающим конструкциям в целях обеспечения: заданных параметров микроклимата, необходимых для жизнедеятельности людей и работы технологического или бытового оборудования; тепловой защиты; защиты от переувлажнения ограждающих конструкций; эффективности расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию; необходимой надежности и долговечности конструкций. Начиная с 2003 г., когда была введена первая редакция СНиП «Тепловая защита зданий», основным расчетным климатическим параметром при проектировании ограждающих конструкций становится величина градусо-суток отопительного периода (ГСОП).

Уменьшение ГСОП является положительным следствием происходящего потепления, которое способствует повышению тепловой эффективности существующих зданий и создает предпосылки для сокращения расходов на отопление (см. также пункт 2.3.7.6). Анализ данных метеорологических наблюдений на интервале 1961-2020 гг. (Хлебникова и др., 2021) показывает, что на территории России за это время продолжительность отопительного периода значительно уменьшилась (до 5 сут/10 лет на севере ЕТР). В меньшей степени изменение продолжительности отопительного периода проявляется в районах АТР с суровыми климатическими условиями. В этих же районах регистрируется наибольшее увеличение средней температуры отопительного периода. Максимальная скорость изменения ГСОП (250 °С/10 лет) достигается на севере АТР (рис. 2.3.7.2а). Сравнение с результатами моделирования (рис. 2.3.7.2б) показывает, что наблюдаемая скорость изменения ГСОП на интервале 1961-2020 гг. лишь незначительно меньше той, которую дают модельные оценки к середине XXI века при использовании сценария RCP8.5 (см. главу 1.1.2). Важно также отметить, что относительное уменьшение ГСОП на АТР – по отношению к значениям за базовый период 1961-1990 гг. – меньше, чем на ЕТР (Кацов и др., 2020).

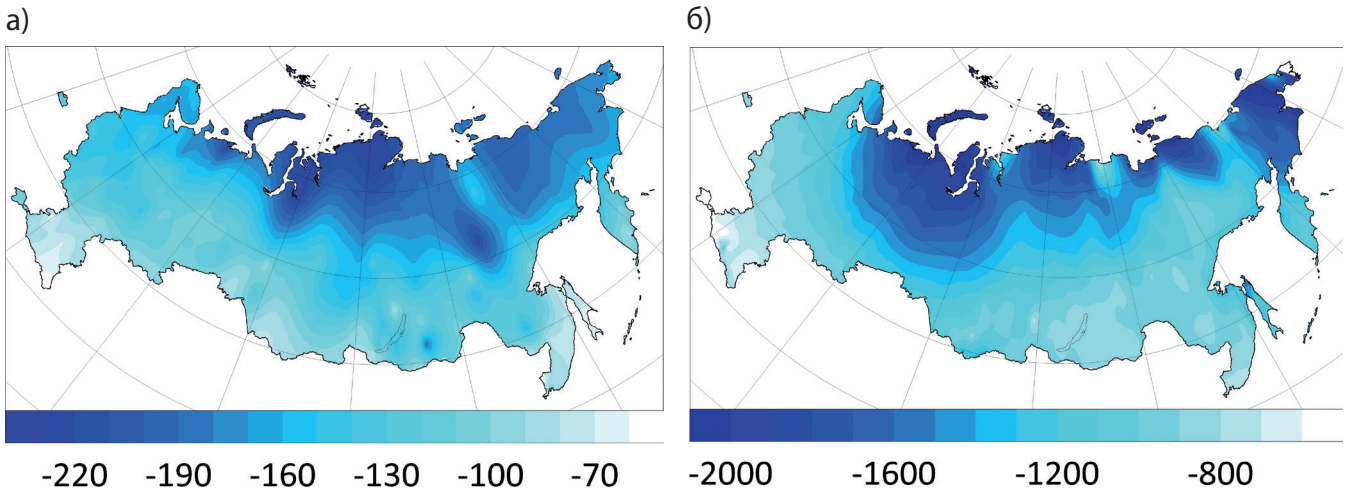



***Рис. 2.3.7.2*** *Изменение градусо-суток отопительного периода по данным наблюдений (слева) и результатам моделирования (справа): а) скорость изменения (°С•сут/10 лет) на интервале 1961-2020 гг.; б) изменение (°С•сут) в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.*

*Пояснение: здесь и далее оценки ожидаемых изменений получены на основе ансамблевых расчетов с региональной климатической моделью (РКМ ГГО) при задании сценария RCP8.5 (Катцов и др., 2020)*

Актуализированная редакция СНиП «Тепловая защита зданий» (Свод правил, 2012), призванная повысить энергоэффективность проектируемых зданий, была нацелена на гармонизацию действующих российских требований с зарубежными нормами проектировании. Вопросы обоснования и дальнейшего развития нормативной базы в современных условиях, предполагающих смягчение изменений климата и адаптацию к ним, обсуждаются во многих работах (Гагарин и др., 2016; Gagarin, 2016; Умнякова и др., 2016; Куприянов, 2017; Спиридонов и др., 2016; Самарин, 2016; Волкова, 2016). Рассматриваются возможности совершенствования метода расчета по защите от переувлажнения ограждающих конструкций. Отмечается необходимость повышения уровня инженерного обеспечения зданий (см. также пункт 2.3.7.4). Обращается внимание на целесообразность более оперативной корректировки нормативных и справочных документов, а также важность учета прогнозов изменения климатических факторов для оптимизации решений. В связи с наблюдаемым и прогнозируемым изменением режима осадков (см. также пункт 2.3.7.6 и часть 1 настоящего Доклада) представляется целесообразным проведение специальных исследований по анализу региональных особенностей климатических изменений влажности воздуха с последующим уточнением карт зон влажности Российской Федерации при актуализации нормативных документов (Свод правил, 2020).

### 2.3.7.3 Атмосферные нагрузки и воздействия

Для обеспечения надежности и долговечности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, первоочередное значение имеет корректный учет атмосферных нагрузок на строительные конструкции. Наряду со снеговыми, ветровыми и гололедными нагрузками (см. также главу 2.3.5), а также их сочетаниями, при проектировании объектов необходимо учитывать и температурные климатические воздействия.

В современной актуализированной версии СНиП «Нагрузки и воздействия» (Свод правил, 2016а) в целях гармонизации с европейскими нормами в качестве нормативных значений температуры воздуха в холодное и теплое время года используются квантили, соответственно, годового минимума и годового максимума температуры воздуха повторяемостью один раз в 50 лет.

Происходящее и ожидаемое потепление, которое приводит к увеличению средних значений сезонных индикаторов экстремальности, хорошо проявляется в изменении частоты превышения различных уровней в отдельные годы. Вероятностный анализ изменения годового максимума температуры воздуха показывает (рис. 2.3.7.3), что в 1991-2020 гг. значения этой величины, превышающие 50-й процентиль для периода 1961-1990 гг., в некоторых районах наблюдались практически ежегодно (частота таких случаев в последнее тридцатилетие увеличилась по отношению к периоду 1961-1990 гг. более чем в 1,8 раза). Одновременно частота появления в 1991-2020 гг. значений годового максимума температуры, превышающих 90-й процентиль для периода 1961-1990 гг., увеличилась в южных районах ЕТР и АТР в 5-6 раз.

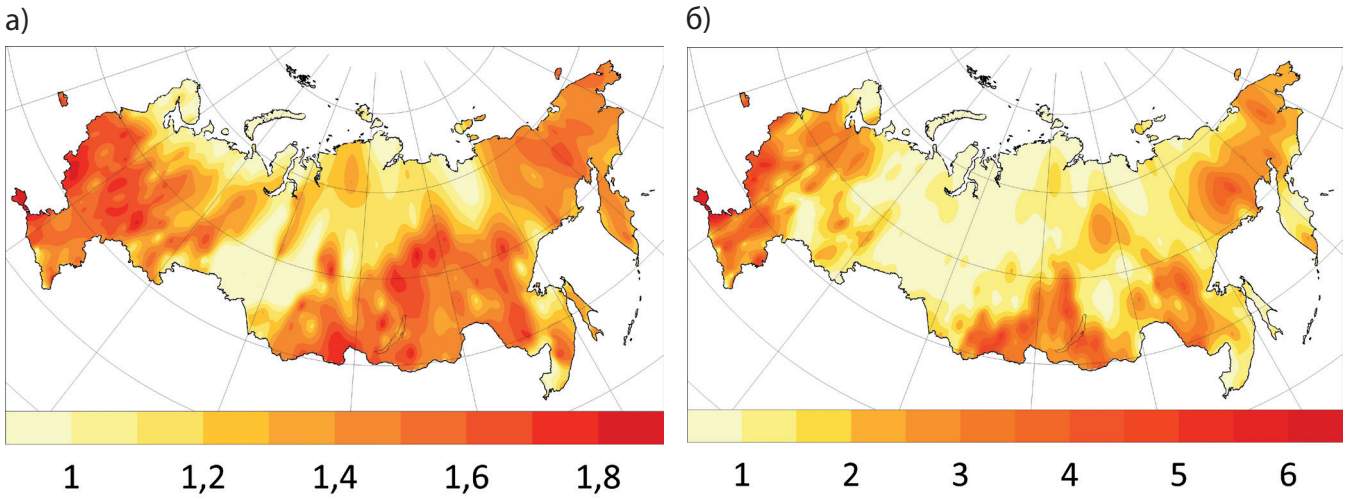



***Рис. 2.3.7.3*** *Изменение частоты превышения 50-го (а) и 90-го (б) процентилей годовых максимумов температуры воздуха в 1991-2020 гг. по отношению к периоду 1961-1990 гг.*

Вероятностный анализ результатов массовых ансамблевых расчетов дал возможность оценить ожидаемые изменения характеристик редких температурных экстремумов, соответствующих повторяемости один раз в 50 лет (рис. 2.3.7.4). Согласно сценарию RCP8.5, в середине XXI века отрицательные изменения в оценках квантилей экстремумов редкой повторяемости отмечаются как в теплый, так и в холодный периоды, хотя зимой их вероятность и невелика. В летний сезон уменьшение рассматриваемых климатических показателей возможно с довольно большой вероятностью (до 50%, а в отдельных пунктах и более) на территории Красноярского края и прилегающих районов (Хлебникова и др., 2019а).

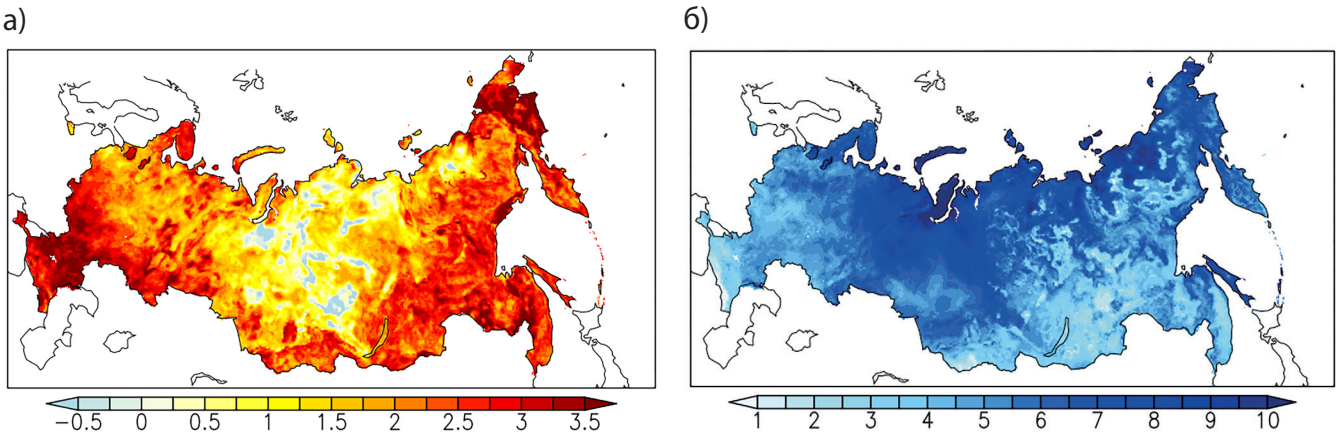



***Рис. 2.3.7.4*** *Медианные ансамблевые оценки изменения (°C) годового максимума (а) и годового минимума (б) температуры воздуха повторяемостью один раз в 50 лет в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.*

Имеющиеся данные наблюдений не дают оснований уверенно говорить об увеличении ветровых нагрузок. На большей части территории России диагностируется слабое уменьшение средней скорости ветра (Росгидромет, 2021). Однако, как указывалось ранее в (Gastineau, Soden, 2009), при сохранении средних значений скоростей ветра возможна трансформация их вероятностных распределений к виду распределений с «тяжелыми хвостами» за счет увеличения вклада штормовых скоростей. В прибрежных районах Арктики и Дальнего Востока уже в настоящее время регистрируется увеличение числа случаев со скоростью ветра, превышающей 15 м/сек, и практически повсеместно наблюдается рост числа опасных явлений, связанных с сильным ветром.

В зарубежных исследованиях анализируются будущие изменения экстремальных скоростей ветра на основе результатов регионального климатического моделирования. В работе (Jeong, Sushama, 2018) показано, что на территории Канады можно ожидать рост экстремально высоких скоростей ветра, наблюдаемых один раз в 50 лет. При этом снеговые нагрузки на севере Канады также возрастут, а в южных районах ожидается их уменьшение. Вывод об увеличении снеговых нагрузок в условиях изменений климата получен также для территории Европы (Croce et al., 2018).

### 2.3.7.4 Долговечность зданий и сооружений

В соответствии с регламентирующими документами долговечность ограждающих конструкций зданий и сооружений определяется сроком их службы без потери эксплуатационных качеств и обеспечивается применением материалов, имеющих «надлежащую стойкость (морозостойкость, влагостойкость, биостойкость, стойкость против коррозии, высокой температуры, циклических температурных колебаний и против других разрушающих воздействий окружающей среды)». Наиболее распространенным видом разрушающего воздействия являются температурно-влажностные деформации. Материалы ограждающих конструкций под переменным воздействием тепла и холода разрушаются, и это разрушение происходит интенсивнее при быстрой смене температур и особенно при перепадах температуры, связанных с переходами через 0°C.

В последние десятилетия в условиях происходящего потепления на территории России наблюдается тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий. Это обусловлено повышением температуры зимнего сезона и ростом числа дней с переходом температуры воздуха через 0°С, наиболее заметно проявляющимся на европейской территории России. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и в особенности количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели. Увлажнение стен зданий, наиболее интенсивное при сильном ветре, и последующее охлаждение приводят к замерзанию воды в порах материалов и оказывают разрушительное воздействие на конструкции. Косые дожди, способствующие аккумуляции влаги в стенах, усиливают также рост плесени на фасадах зданий, что представляет особую опасность для исторических объектов (Nik et al., 2015; Orr et al., 2018).

Долговечность напрямую зависит от числа циклов замораживания и оттаивания материала наружных стен. Тенденция к увеличению числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С, наблюдаемая в последние десятилетия на ЕТР и в южных регионах Сибири (рис. 2.3.7.5), свидетельствует об усилении разрушающего воздействия среды, которое приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий, автодорог и других сооружений.

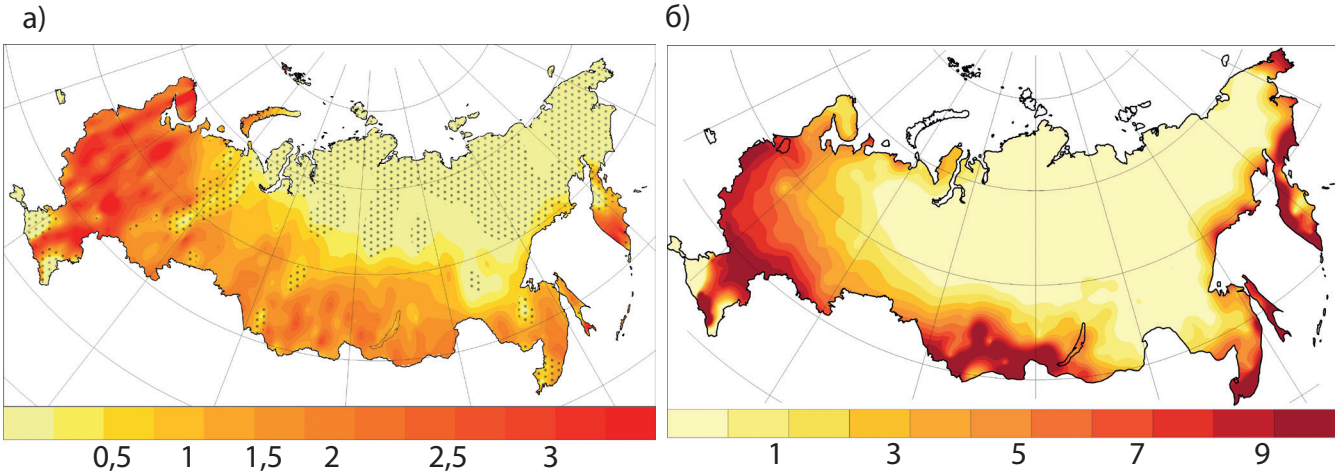



***Рис. 2.3.7.5*** *Изменение климатических факторов долговечности сооружений по данным наблюдений (слева) и результатам моделирования (справа): а) скорость изменения (дни/10 лет) числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (ноябрь – март) на интервале 1961-2020 гг.; б) изменение числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (ноябрь – март) в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.*

В работе (Лобов и др., 2016) обсуждается вопрос о взаимосвязи проблемы долговечности зданий и их тепловой защиты. Обращается внимание на реальные теплозащитные свойства и низкую долговечность многослойных конструкций стен, получивших распространение в связи с декларируемыми целями повышения энергоэффективности зданий. Дается рекомендация об использовании долговечных стеновых материалов и продвижении современных домов из монолитного бетона в северные районы и на Дальний Восток.

### 2.3.7.5 Микроклимат зданий

Вопрос обеспечения комфортных условий жизнедеятельности человека лежит в основе создания оптимального микроклимата помещения. Этот вопрос актуален не только для холодного периода года, когда необходим обогрев помещений, но и для теплого периода. В современных условиях поддержание теплового комфорта в зданиях в летний сезон становится важной задачей на значительной территории России.

В качестве количественных характеристик потенциального энергопотребления в летний сезон используются различные климатические показатели (Дворецкий и др., 2019). В мировой практике широко применяется показатель CDD (градусо-сутки периода охлаждения или дефицит холода), количественно равный сумме положительных отклонений температуры воздуха от базового значения, равного 18 °С. Знание этого показателя дает возможность легко перейти к оценке энергопотребления на поддержание теплового комфорта в помещении в летний сезон (Ливчак, 2015).

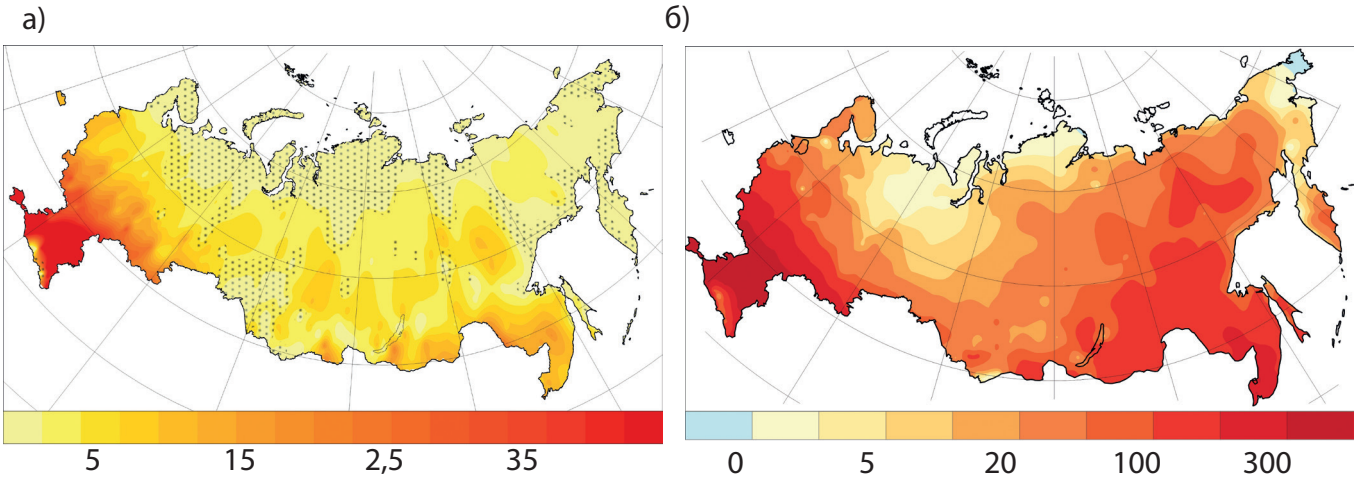



***Рис. 2.3.7.6*** *Изменение индекса энергопотребления в летний сезон по данным наблюдений (слева) и по результатам моделирования (справа): а) скорость изменения дефицита холода (°С•сут/10лет) на интервале 1961-2020 гг.; б) изменение дефицита холода (°С•сут) в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.*

Рост дефицита холода на большей части территории России проявляется по данным наблюдений уже в настоящее время (рис. 2.3.7.6), причем не только на ЕТР, но и на АТР. При сравнении дефицита тепла (градусо-суток отопительного периода) и дефицита холода нужно иметь в виду, что увеличению дефицита холода соответствует большее энергопотребление, чем соответствующему значению изменения ГСОП (Ливчак, 2015; Самарин, Лушин, 2020).

В связи с ростом энергопотребления в летнее время особую актуальность приобретает задача проектирования и внедрения эффективных систем кондиционирования, максимально полно учитывающих необходимые климатические характеристики и их изменения. К числу параметров климата, используемых при проектировании систем обеспечения микроклимата гражданских зданий, относится энтальпия наружного воздуха (Самарин, 2021). Анализ наблюдаемых изменений этой величины по такому показателю, как число часов за год со значениями удельной энтальпии, превышающими критическое значение 40 кДж/кг, показывает (рис. 2.3.7.7), что практически на всей терри-

тории страны диагностируется значимое увеличение рассматриваемого индикатора, характеризующего продолжительность периода целесообразного кондиционирования.

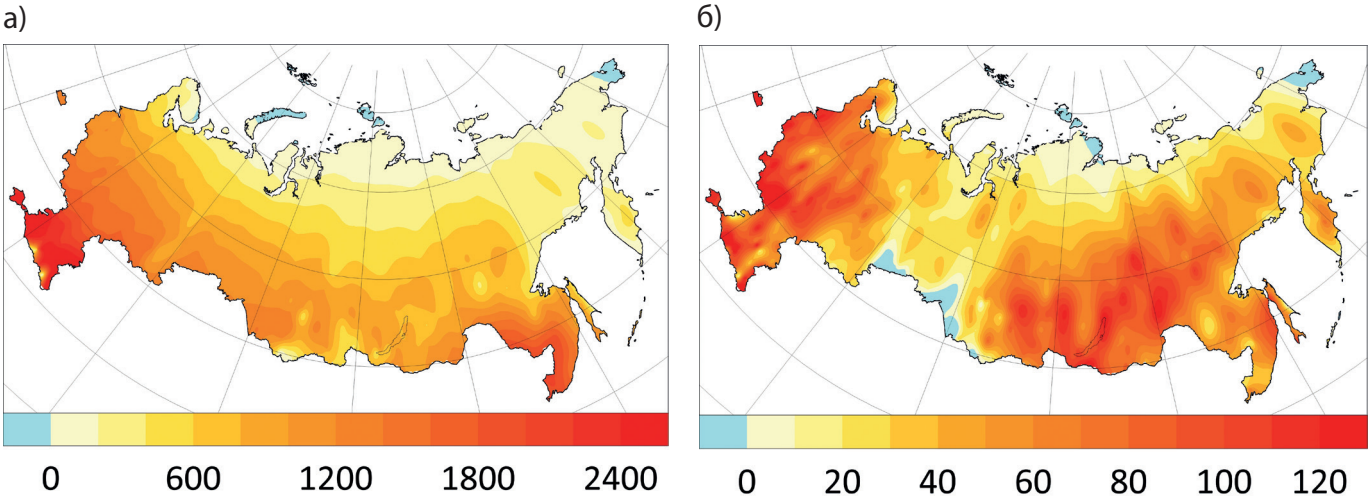



***Рис. 2.3.7.7*** *Среднее число часов со значениями энтальпии наружного воздуха выше 40 кДж/кг (а) и скорость его изменения (час/10лет) на интервале 1977-2020 гг. (б)*

Детальные исследования температурно-влажностных условий и энергоэффективности для конкретных объектов строительства базируются на применении физических моделей тепловлагопереноса, которые предполагают использование в качестве входных данных совокупности метеорологических параметров внешней среды с высоким временным разрешением. В отечественной литературе широко распространено понятие «типового года», используемого по отношению к наблюдаемому климату (Гагарин и др., 2013; Умнякова, 2016). В современной зарубежной литературе много внимания уделяется методологии формирования таких «типовых» и «экстремальных» совокупностей на основе результатов моделирования будущего климата (Jenkins et al., 2014; Nik, 2016, 2017; Heracleous, Michael, 2018; Liu et al., 2017).

### 2.3.7.6 Жилищно-коммунальное хозяйство

Жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) представляет собой отрасль сферы услуг и часть территориальной инфраструктуры, определяющую условия жизнедеятельности человека, прежде всего комфортности жилища, его инженерное благоустройство, качество и надежность услуг транспорта, связи, бытовых и других услуг.

Центральное место в системе ЖКХ занимает коммунальная энергетика, обеспечивающая функционирование систем теплоснабжения и электроснабжения во все сезоны года. Сокращение продолжительности и градусо-суток отопительного периода является одним из существенных проявлений изменений климата на территории России и в перспективе может способствовать уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий и препятствующими энергосбережению (Самарин, 2017). Для извлечения потенциальных

выгод необходимо внедрение современных технологий производства энергии и систем теплоснабжения (Хлебникова, Дацюк, 2014; Приоритеты, 2017, Катцов и др., 2019). Как показывают модельные оценки, при отсутствии модернизации на значительной территории России сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов. На основе массовых ансамблевых расчетов получены вероятностные характеристики числа дней с избыточным и недостаточным потреблением тепла (для зданий, входящих в систему централизованного теплоснабжения и не имеющих автономных систем регулирования теплопотребления). При сохранении действующих технологий к концу XXI века на европейской части России доля среднего числа дней с избыточным потреблением тепла может превысить 70% от общей продолжительности отопительного периода (рис. 2.3.7.8). При этом число дней с дефицитом тепла также вырастет. Уже к середине XXI века в 5-7 раз увеличится частота зим, связанных с высоким избыточным теплопотреблением, вероятность которых в конце XX века составляла лишь 5%.

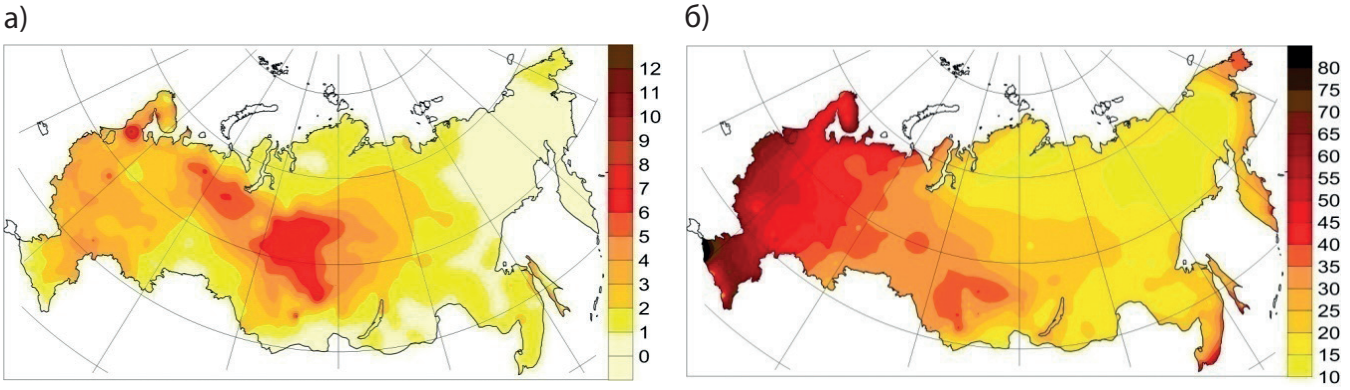



***Рис. 2.3.7.8*** *Изменение эффективности функционирования системы теплоснабжения:*
*а) мультипликатор частоты редких (возможных один раз в 20 лет) экстремумов числа дней с избыточным теплопотреблением в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.; б) доля (в %) числа дней с избыточным теплопотреблением от общей продолжительности отопительного периода в 2090-2099 гг.*

Важнейшими составляющими ЖКХ являются системы водоснабжения и водоотведения, на функционирование которых существенное воздействие оказывает режим атмосферных осадков. По мере потепления климата ожидается увеличение суммы осадков – как в холодный, так и в теплый сезоны – практически на всей территории России (см. часть 1). При этом, однако, значительно изменится режим выпадения осадков. Рост экстремальности осадков будет проявляться как в увеличении их интенсивности (на разных временных масштабах), так и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков. Согласно модельным оценкам (Хлебникова и др., 2019б), к середине XXI века ожидается увеличение средних значений максимальной непрерывной продолжительности засушливых периодов в центральных и южных районах ЕТР и прилегающих районах Западной Сибири, а также в Приамурье, Приморье и на Камчатке. Как показывают современные расчеты (Катцов

и др., 2020), в дальнейшем, к концу века, частота продолжительных периодов с дефицитом осадков, вероятность которых в конце XX века составляла 10%, увеличится в критических областях более чем в два раза (рис. 2.3.7.9). При этом на юго-востоке ЕТР, в частности в Волгоградской области, будут отмечаться засушливые периоды экстремальной продолжительности, превышающей современные средние значения более чем на один месяц (Катцов и др., 2019). Такие изменения в южных районах России могут привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

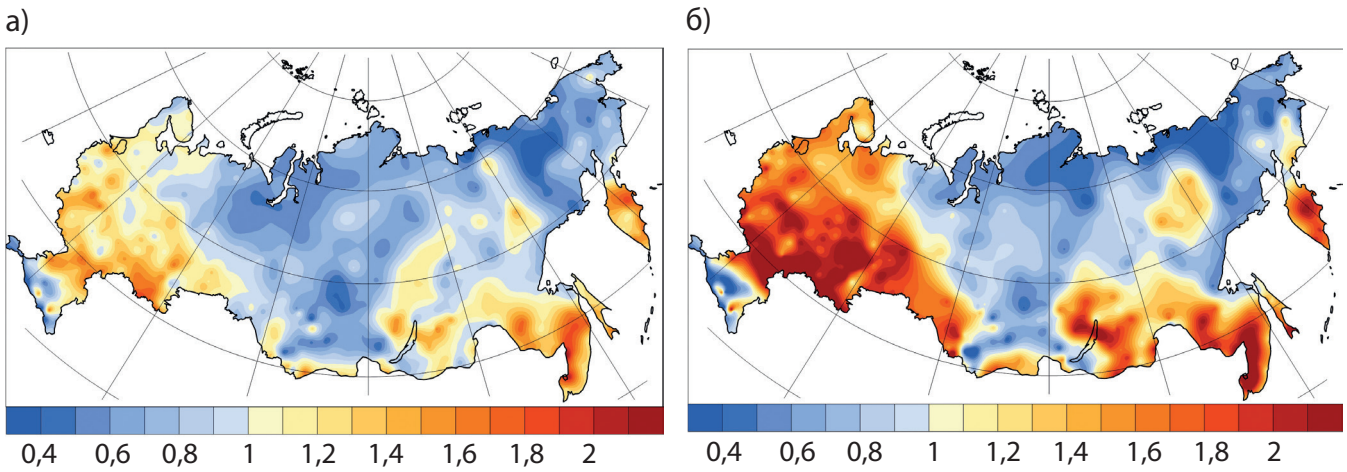



***Рис. 2.3.7.9*** *Изменение частоты превышения 90-го процентиля максимальной продолжительности сухого периода теплого сезона в 2050-2059 гг. (а) и 2090-2099 гг. (б) по отношению к 1990-1999 гг. Под сухим периодом здесь понимается период с суточными суммами осадков P <1 мм*

Вместе с тем рост суточных экстремумов осадков (рис. 2.3.7.10), сочетающийся с увеличением их интенсивности, приводит к проблемам с водоотведением. Уже в настоящее время (например, в Санкт-Петербурге) становится актуальной модернизация системы водоотведения на основе использования новых нормативных значений интенсивности осадков.

Рост суточных максимумов осадков в холодный сезон оказывает также неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приводит к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

В летний период ожидается весьма заметное увеличение такого показателя, как дефицит холода, который можно рассматривать как индекс энергопотребления (рис. 2.3.7.6). В настоящее время рост энергопотребления летом сдерживается низким уровнем благосостояния населения, однако в перспективе для обеспечения оптимального микроклимата внутри зданий системы кондиционирования воздуха найдут более широкое применение, и потребление энергии будет отражать климатически-обусловленные изменения.

Важно подчеркнуть, что на фоне сравнительно слабого среднего увеличения дефицита тепла ожидаются – и наблюдаются уже в настоящее время – периоды пиковой нагрузки на энергосистемы, связанные с волнами тепла (см. раздел 1.2). В такие периоды резко возрастает число отказов во многих технических системах, обеспечивающих функционирование городского хозяйства (система водоснабжения, транспорт-

ная система и др.) и увеличиваются риски аварий. Каскадный характер аварийности связан с возникновением условий, выходящих за рамки предписанных на этапе проектирования, для многих материалов и механизмов.

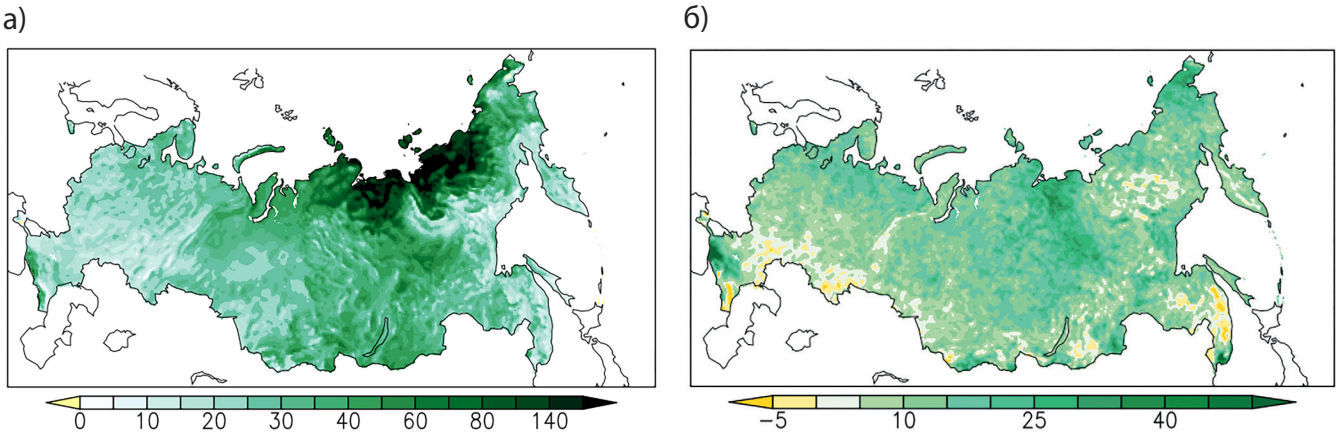



***Рис. 2.3.7.10*** *Изменение (в %) сезонных максимумов суточных сумм осадков в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. для холодного (а) и теплого (б) сезонов*

### 2.3.7.7 Вероятностные оценки рисков критических температурных воздействий на объекты инфраструктуры

Степень существенности ожидаемых изменений хорошо проявляется при анализе рисков угрожающих событий, которые могут привести к возникновению крупных ущербов. С точки зрения надежности функционирования различных конструкций, объектов инфраструктуры и систем жизнеобеспечения принципиальным является соответствие реальных климатических условий тем нормативам экстремальности, которые задавались при их проектировании. В условиях нестационарности климата оптимальный выбор нормативов – по сравнению со стационарным вариантом – существенно осложняется. При стационарном климате знание функции распределения и задание периода повторяемости являются достаточными для оценки вероятности наступления угрожающего события для любого временного интервала в будущем. В нестационарных условиях требуются привязка к определенному периоду, представляющему интерес с точки зрения потребителя, и соответствующая климатическая информация об ожидаемых изменениях в распределении экстремумов.

Вопрос о выборе критериев для определения требуемой жесткости нормативов с учетом изменений климата обсуждается довольно широко, особенно в контексте гидротехнического строительства (Du et al., 2015; Rootzen, Katz, 2013). Один из возможных вариантов базируется на оценке рисков критических воздействий на выбранном временном интервале (т.е. оценке вероятности наступления критического события хотя бы в одном году в течение выбранного периода).

Результаты массовых ансамблевых расчетов дают возможность произвести вероятностную оценку рисков различных неблагоприятных событий, связанных с изменением климатических показателей экстремальности. В работе (Хлебникова и др., 2019а) выполнена оценка

рисков экстремально высоких температурных воздействий на интервале 2050-2059 гг., превышающих температуру наиболее жарких суток 98%-й обеспеченности для базового периода. Расчет значений мультипликатора риска (т.е. коэффициента увеличения риска) к середине XXI века по отношению к концу XX века показывает (рис. 2.3.7.11), что вероятность сохранения уровня риска на большей части территории России не превышает 5%. В то же время с вероятностью 50% на значительной части территории (на юге ЕТР, в Приморье) соответствующие риски увеличатся примерно в пять раз, что означает практически неизбежное наступление рассматриваемого неблагоприятного события.

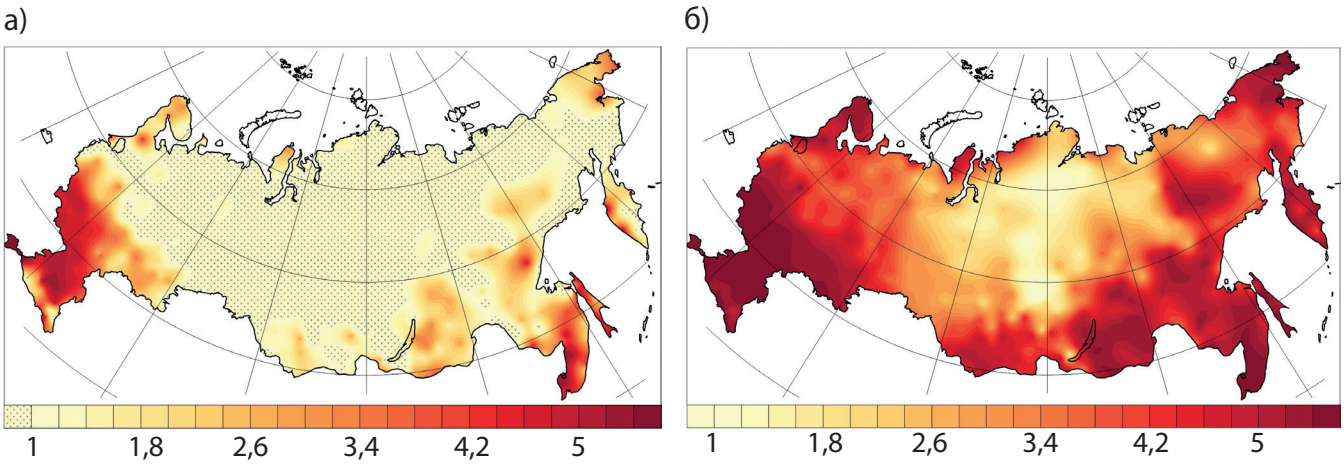



***Рис. 2.3.7.11*** *Вероятностные оценки мультипликатора риска экстремально высоких температур в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) 5-й процентиль; б) 50-й процентиль*

*Оценки получены при задании в качестве критического уровня базовых параметров температуры наиболее жарких суток 98%-й обеспеченности*

Важно отметить, что для территории России, являющейся в целом очень холодной страной, значительную экономическую составляющую имеет также корректная оценка сохраняющихся рисков, связанных с критическими воздействиями экстремально низких температур в зимний период. Развитие методологии оценки и анализ соответствующих рисков будут способствовать извлечению потенциальной выгоды, обусловленной уменьшением суровости климата, при обеспечении необходимого уровня надежности зданий и сооружений. В современных условиях эта проблема приобретает особую актуальность в строительном проектировании в связи с задачей расчета глубины промерзания грунта для определения глубины заложения фундаментов зданий (Свод правил, 2016б).

Результаты оценки прикладных климатических показателей, в том числе характеристик экстремальности, по данным наблюдений и результатам моделирования наглядно показывают, что обновление нормативных параметров, основанное только на исторических данных, не может считаться достаточной мерой для адаптации к изменениям климата, особенно если речь идет о строительстве объектов с длительным сроком эксплуатации. Необходимо тесное взаимодействие специалистов-климатологов и представителей заинтересованных отраслей с целью выработки новых подходов к определению нормативов экстремальности на основе вероятностных оценок ожидаемых изменений и с учетом интересов конкретных потребителей.

## Список литературы


**Волкова Н. Г., 2016:** Опыт технического нормирования. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности // Строительная климатология. – № 4. – С. 217-221.

**Гагарин В. Г., Иванов Д. С., Малявина Е. Г., 2013:** Разработка климатической информации в форме специализированного «типового года» // Вестник ВолгГАСУ, серия «Строительство и архитектура», Вып. 31 (50), часть 1: «Города России. Проблемы проектирования и реализации». – с. 343-349.

**Гагарин В. Г., Козлов В. В., Зубарев К. П., 2016:** Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. – № 6. – С. 8-12.

**Дворецкий А. Т., Спиридонов А. В., Митрофанова С. А., Денисова Т. В., 2019:** О необходимости определения градусо-суток периода охлаждения зданий на территории России // Жилищное строительство. – № 8. – С. 46-49.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник Е. И., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В., 2017:** Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 68-80.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н., Хлебникова Е. И., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Рудакова Ю. А., Салль И. А., Байдин А. В., Задворных В. А., 2019:** Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. 2 часть: Оценки климатических воздействий // Труды ГГО. – Вып. 593. – С. 6-52.

**Куприянов В. Н., 2017:** Совершенствование метода расчета по защите от переувлажнения ограждающих конструкций // Жилищное строительство. – № 5. – С. 38-43.

**Ливчак В. И., 2015:** Роль градусо-суток охладительного периода при расчете потребности жилых домов в охлаждении // Энергосбережение. – № 7. – С. 22-27.

**Лобов О. А., Ананьев А. И., Рымаров А. Г., 2016:** Основные причины несоответствия фактического уровня тепловой защиты наружных стен современных зданий нормативным требованиям // Промышленное и гражданское строительство. – № 11. – С. 67-71.

**Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., 2014:** Новое поколение климатических моделей / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет. – С. 286-320.

**Приоритеты устойчивого развития Москвы: энергоэффективность, снижение уязвимости, климатическая адаптация, 2017:** В сб.: Материалы научно-практической конференции «Экология Московского региона – 2017» / Гашо Е. Г., Степанова М. В. ред. –М. – 56 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.). – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Росгидромет, 2021:** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. – М.: Росгидромет. – 98 с.

**Самарин О. Д., 2016:** Технико-экономическое обоснование термомодернизации жилых зданий в современных условиях // Жилищное строительство. – № 5. – С. 31-35.

**Самарин О. Д., 2017:** Об обоснованном определении границ отопительного сезона // Жилищное строительство. – № 1-2. – С. 33-35.

**Самарин О. Д., 2021:** Аналитический расчет энтальпии наружного воздуха в теплый период года с использованием данных СП 131.13330.2018 // Жилищное строительство. – № 3. – С. 44-47.

**Самарин О. Д., Лушин К. И., 2020:** Оценка влияния изменения климата на энергопотребление систем обеспечения микроклимата зданий // Жилищное строительство. – № 1-2. – С. 21-24.

**Свод правил, 2012:** Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России. – 101с.

**Свод правил, 2016а:** Свод правил СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. – М.: Минстрой России. – 95 с.

**Свод правил, 2016б:** Свод правил СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Минстрой России. – 228 с.

**Свод правил, 2020:** Свод правил СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. – М.: Минстрой России. – 153 с.

**Спиридонов А. В., Шубин И. Л., Малявина Е. Г., Самарин О. Д., 2016:** Мониторинг и анализ нормативных документов в строительстве в области внутреннего климата помещений и защиты от вредных воздействий. Часть 2. Температурно-влажностный режим и качество воздуха в помещениях // Бюллетень строительной техники. – № 5. – С. 20-26.

**Умнякова Н. П., 2016:** Климатические параметры типового года для теплотехнических инженерных расчетов // Бюллетень строительной техники. – № 8. – С. 48-51.

**Умнякова Н. П., Бутовский И. Н., Верховский А. А., Чеботарев А. Г., 2016:** Требования к теплозащите наружных ограждающих конструкций высотных зданий // Жилищное строительство. – № 12. – С. 7-11.

**Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А., 2014:** Строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс. В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет. – С. 801-830.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019а.:** Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 11-23.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М., 2019б.:** Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 5-16.

**Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2021:** Вероятностные оценки прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 7, № 2. – С. 140-158.

**Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015:** Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – Вып. 576. – С. 201-211.

**Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н., 2012:** Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. – № 2. – С. 5-23.

**Chalmers P., 2014:** Climate Change: Implications for Buildings – Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report, Cambridge, 20 p.

**Croce P., Formichi P., Landi F., Mercogliano P., Bucchignani E., Dosio A., Dimova S., 2018:** The snow load in Europe and the climate change // Climate Risk Management, v. 20, pp. 138-154.

**Du T., Xiong L., Xu C., Gippel C. J., Guo S., Liu P., 2015:** Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change // Journal of Hydrology, v. 527, pp. 234-250.

**Gagarin V. G., 2016:** Thermal Performance as the Main Factor of Energy Saving of Buildings in Russia // Procedia Engineering, v. 146, pp. 112-119.

**Gastineau G., Soden B. J., 2009:** Model projected changes of extreme wind events in response to global warming // Geophysical Research Letters, v. 36, L10810.

**Heracleous C., Michael A., 2018:** Assessment of overheating risk and the impact of natural ventilation in educational buildings of Southern Europe under current and future climatic conditions // Energy, v. 165, pp. 1228-1239.

**Jenkins D. P., Patidar S., Banfill P., Gibson G., 2014:** Developing a probabilistic tool for assessing the risk of overheating in buildings for future climates // Renewable Energy, v. 61, pp. 7-11.

**Jeong D. I., Sushama L., 2018:** Projected changes to extreme wind and snow environmental loads for buildings and infrastructure across Canada // Sustainable Cities and Society, v. 36, pp. 225-236.

**Liu C., Kershaw T., Fosas D., Ramallo Gonzalez A. P., Natarajan S., Coley D. A., 2017:** High resolution mapping of overheating and mortality risk // Building and Environment, v. 122, pp. 1-14.

**Nik V. M., 2016:** Making energy simulation easier for future climate–Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs) // Applied Energy, v. 177, pp. 204-226.

**Nik V. M., 2017:** Application of typical and extreme weather data sets in the hygrothermal simulation of building components for future climate – A case study for a wooden frame wall // Energy and Buildings v. 154, pp. 30-45.

**Nik V. M., Mundt-Petersen S. O., Kalagasidis A. S., De Wilde P., 2015:** Future moisture loads for building facades in Sweden: Climate change and wind-driven rain // Building and Environment, v. 93, pp. 362-375.

**Orr S. A., Young M., Stelfox D., Curran J., Viles H., 2018:** Wind-driven rain and future risk to built heritage in the United Kingdom: Novel metrics for characterising rain spells // Science and Total Environment, v. 640-641, pp. 1098-1111.

**Rootzén H., Katz R., 2013:** Design Life Level: Quantifying risk in changing climate // Water Resources Research, v. 49, pp. 5964-5972.

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6.

## 2.3.8 Инфраструктура в зоне многолетней мерзлоты

***О. А. Анисимов, С. В. Бадина***

Согласно современным представлениям, многолетняя мерзлота занимает 9-12% площади всех континентов (13,2-18,0 млн км$^2$), а вся криолитозона, в которую входят также области прерывистого и островного распространения мерзлоты, – 23-25% суши (Gruber, 2012). В России многолетнемерзлые грунты имеют сплошное распространение (более 90% площади) на территории 7 млн км$^2$, на 1,8 млн км$^2$ – прерывистое (от 50 до 90%) и на 2,5 млн км$^2$ – островное (от 10 до 50%) и редкоостровное (менее 10%) (Анисимов, Шерстюков, 2016).

Состояние мерзлоты описывается двумя основными параметрами: среднегодовой температурой грунта и мощностью сезонноталого слоя (СТС). В последнее десятилетие температура мерзлоты в северном полушарии увеличилась на 0,39 ± 0,15 °С в зоне сплошного и на 0,20 ± ± 0,10 °С в зоне прерывистого распространения (Biskaborn et al., 2019). Такие различия закономерны, поскольку в более «теплых» грунтах с температурой выше –2 °С значительная часть тепла расходуется на фазовые переходы, в то время как в сплошной криолитозоне оно идет лишь на увеличение температуры.

Данные наблюдений указывают на почти повсеместную деградацию многолетней мерзлоты (рис. 2.3.8.1, (Anisimov, Zimov, 2020)).

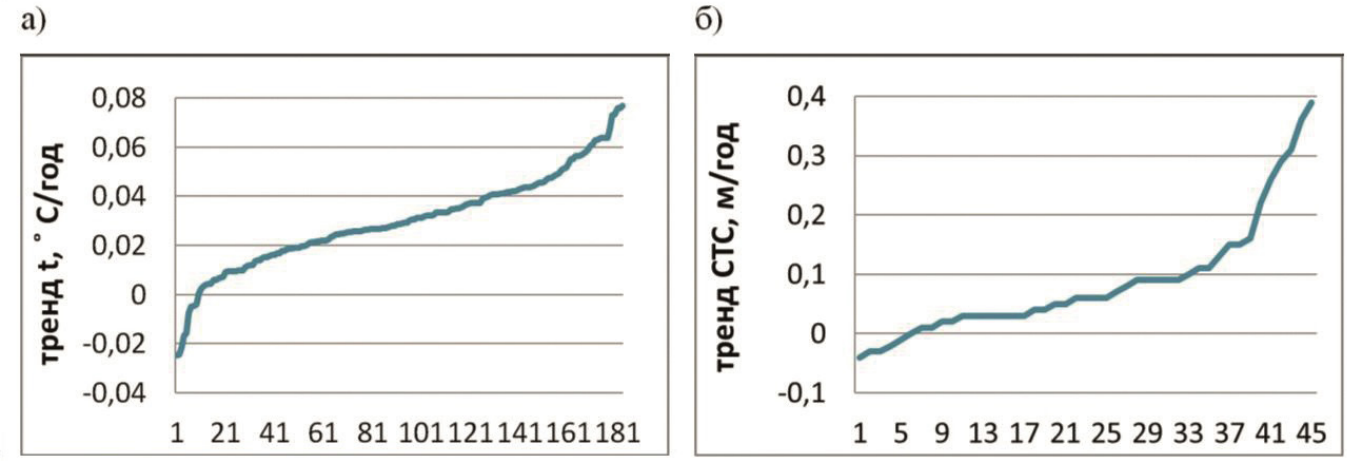



***Рис. 2.3.8.1*** *Ранжированные тренды среднегодовой температуры грунта (а) и мощности СТС (б) для криолитозоны России. Данные 181 метеостанции и 45 площадок за период 1980-2019 гг.*

В Оценочных докладах Росгидромета (Росгидромет, 2008, 2014) были рассмотрены прогнозы изменения многолетней мерзлоты; техногенное воздействие на мерзлоту в сопоставлении с климатическим; примеры нарушения целостности объектов инфраструктуры; метод прогноза геокриологических рисков и прогностические карты для середины XXI века; технические методы адаптации различных типов инфраструктуры к прогнозируемым изменениям мерзлоты. В данной главе представлены социально-экономические оценки геокриологических рисков.

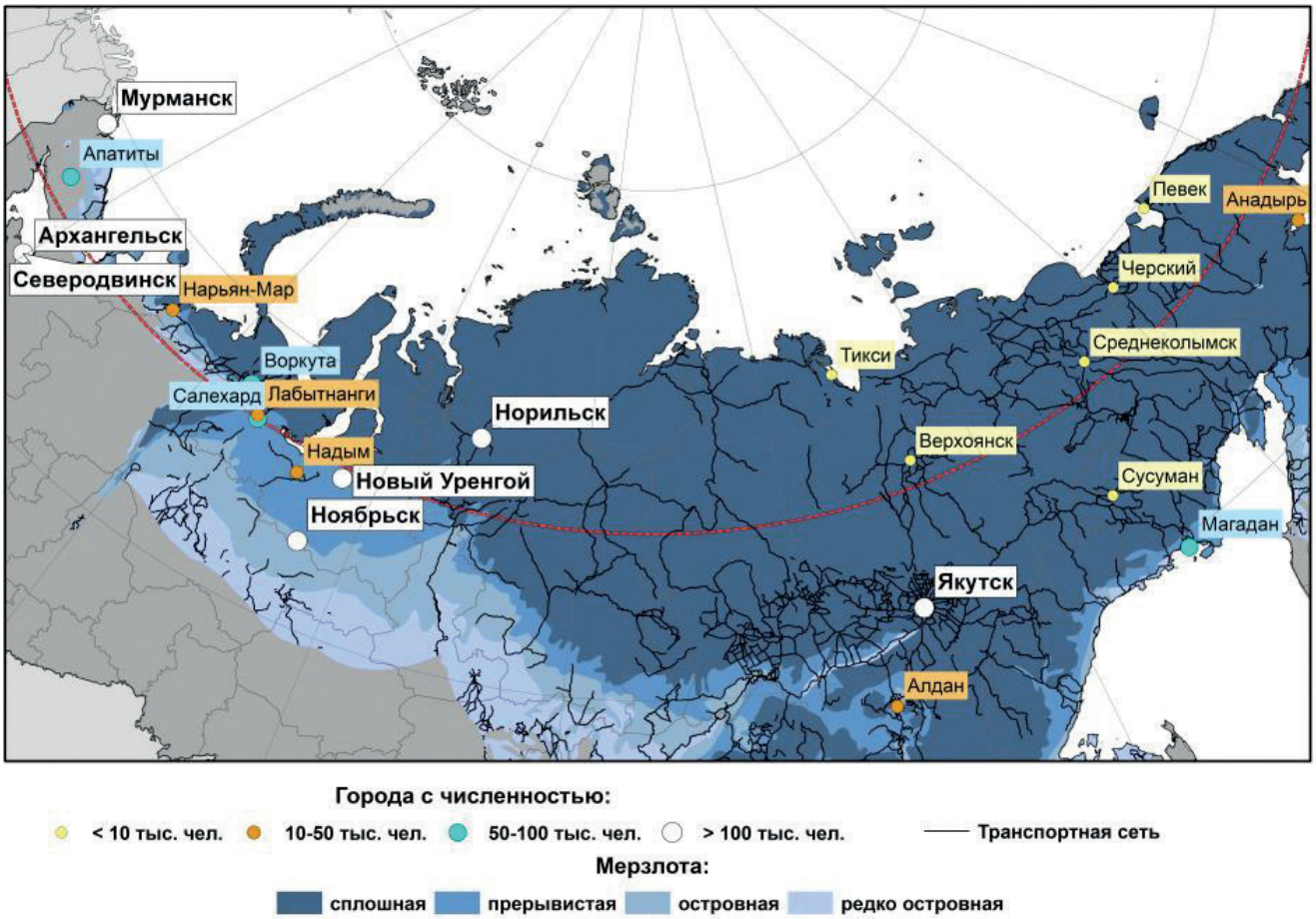



***Рис. 2.3.8.2*** *Города исследуемого региона и границы криолитозоны России (Анисимов и др., 2012)*

По данным Росстата за 2020 г., в АЗРФ проживает 2,1 млн человек, или 1,5% населения страны. Это высокоурбанизированная территория, доля городского населения в которой составляет в среднем 88% (табл. 2.3.8.1). Помимо приблизительно 370 деревень и поселков, здесь расположен 21 город с населением свыше 15 тысяч человек, в том числе шесть городов с населением более 100 тыс. человек (рис. 2.3.8.2). Регион дает более 15% добываемой в России нефти и 80% газа (данные 2016 г., опубликованные в (Streletskiy et al., 2019)). Две эти отрасли формируют 30% бюджета страны и более половины стоимости суммарного экспорта (Simola, Solanko, 2017). По данным за 2010 г., вклад России в валовый выпуск продукции (ВВП) всей Арктики составил 71% (Huskey et al., 2014), а вклад АЗРФ в ВВП России достигает 10% (Лексин, Порфирьев, 2019).

В работе (Orttung et al., 2020) проведен анализ 46 арктических городов по 128 социально-экономическим показателям. Развитая инфраструктура обуславливает высокие значения многих ключевых показателей российских городов по сравнению с зарубежными. В АЗРФ на душу населения потребление энергии ниже в 5 раз, воды ниже на 30%, прежде всего за счет централизованного газо-, тепло- и водоснабжения; питьевым водоснабжением обеспечено 99% населения, что на 20% выше, чем в зарубежной Арктике; число больничных коек выше в 3 раза; в 2 раза больше учреждений культуры и спорта, на них выделяется в 3 раза большая доля муниципального бюджета; в 1,5 раза больше подключений к интернету и мобильных телефонных соединений; на 25% больше протяженность маршрутов общественного транспорта.

***Таблица 2.3.8.1*** *Численность (тыс. жителей) и доли (%) городского и сельского населения АЗРФ по данным Росстата за 2020 г.*

| Регион | Численность городского населения | | Численность сельского населения | |
|---|---|---|---|---|
| | тыс. чел. | % | тыс. чел. | % |
| Мурманская обл. | 683,4 | 92 | 58,0 | 8 |
| Республика Карелия | 27,4 | 68 | 13,1 | 32 |
| Архангельская обл. | 595,3 | 93 | 45,3 | 7 |
| Ненецкий АО | 32,5 | 74 | 11,6 | 26 |
| Ямало-Ненецкий АО | 457,1 | 84 | 87,4 | 16 |
| Республика Коми | 72,7 | 99 | 0,4 | 1 |
| Красноярский край | 208,2 | 91 | 21,3 | 9 |
| Республика Саха (Якутия) | 26,3 | 39 | 41,4 | 61 |
| Чукотский АО | 35,2 | 71 | 14,5 | 29 |
| **АЗРФ** | **2138,1** | **88** | **293** | **12** |

Впервые количественная оценка риска повреждения инфраструктуры для криолитозоны Северного полушария была дана в (Nelson et al., 2001). Она основана на расчетном индексе геокриологического риска, который характеризует изменение мощности СТС и потенциальную просадку грунта при оттаивании. В последующих работах, обзор которых дан во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014), проводилось картирование этого индекса, рассчитанного для различных климатических проекций. На рис. 2.3.8.3 показана одна из таких карт, рассчитанная с использованием ансамблевого климатического сценарного прогноза CMIP5 на середину XXI века для сценария RCP8.5. Индекс геокриологического риска наиболее применим для построенных на насыпях линейных объектов, повреждения которых часто обусловлены неравномерной осадкой и пучением грунтов вдоль полотна. К ним относится вся транспортная сеть криолитозоны, показанная на рис. 2.3.8.3.

Трубопроводы и большинство точечных жилых и промышленных объектов в криолитозоне построены на свайных фундаментах и опорах. На боковой поверхности свай образуется лед-цемент, скрепляющий их с мерзлым грунтом. Он берет на себя до 80% нагрузки на сваю и определяет ее несущую способность. Прочность льда-цемента уменьшается при увеличении температуры грунта; обусловленное этим уменьшение несущей способности стандартных строительных свай можно рассчитать, используя эмпирические зависимости от температуры грунта. Карты на рис. 2.3.8.4 показывают, что несущая способность свайных фундаментов уже умень-

шилась повсеместно на 20-40%, при том что запас прочности по СНиП должен быть не менее 40%. В ближайшее десятилетие на большей части криолитозоны он будет превышен, а к середине XXI века этот показатель будет превышен повсеместно.

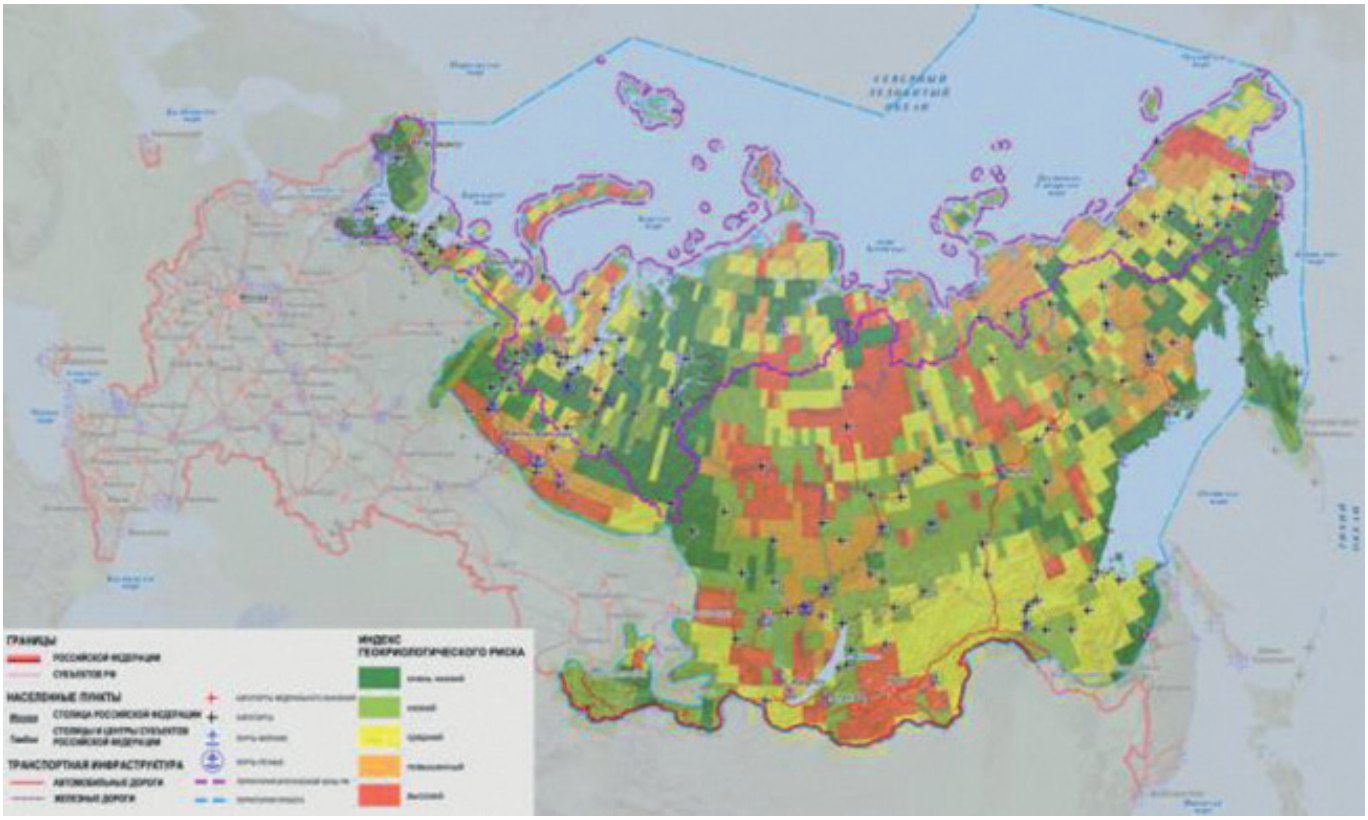


***Рис. 2.3.8.3*** *Индекс геокриологического риска, рассчитанный по ансамблевому климатическому сценарному прогнозу CMIP5 для середины XXI века*

В ряде недавних работ впервые были даны оценки экономической составляющей рисков повреждения инфраструктуры. В работе (Hjort et al., 2018) был предложен комплексный индекс, в котором рассмотренный ранее индекс геокриологического риска дополнен бинарными показателями (высокое и низкое значения), характеризующими тип грунта (скальный или минеральный), изменение его свойств при промерзании, содержание льда и близость мерзлоты к началу оттаивания. Учитывались также экспозиция и уклон поверхности почвы. Были выделены зоны низкого, среднего и высокого значений комплексного индекса риска. По опубликованным данным была проведена инвентаризация и географическая привязка различных видов инфраструктуры к конкретным ареалам деградации многолетней мерзлоты (рис. 2.3.8.5).

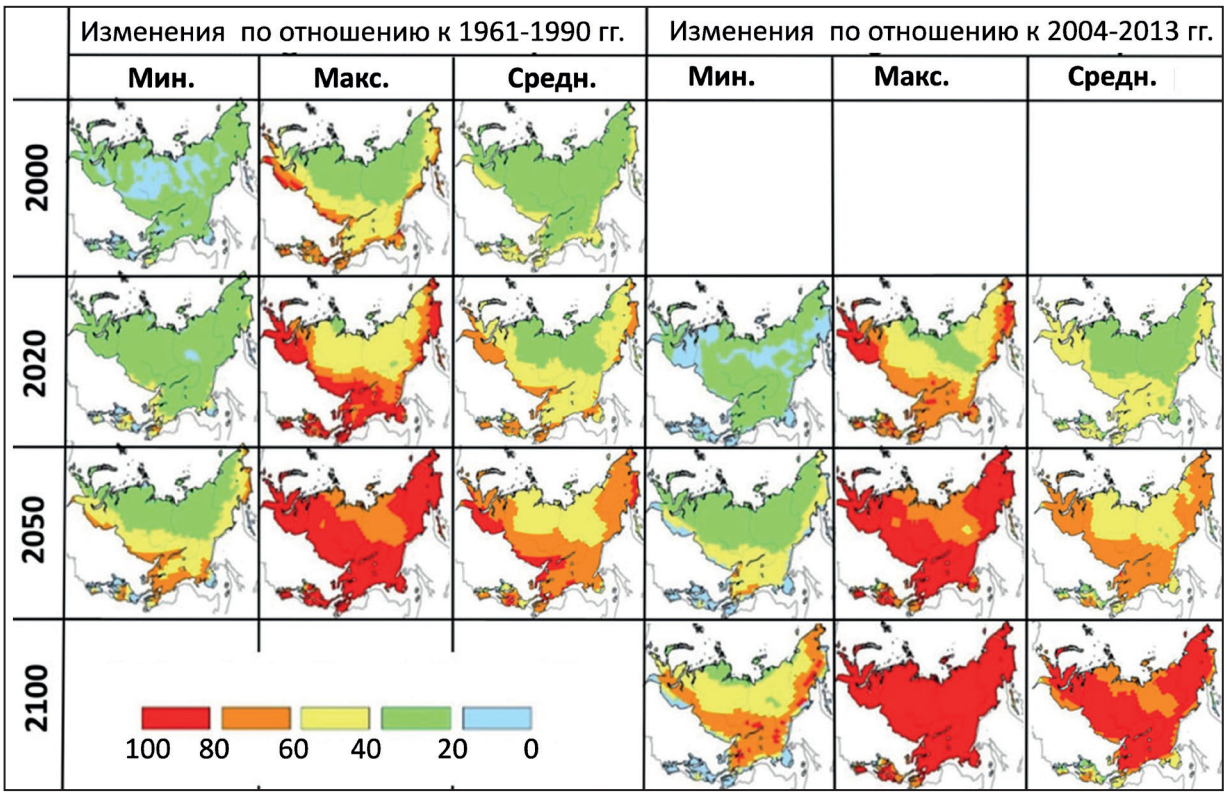



***Рис. 2.3.8.4*** *Относительные изменения несущей способности свайных фундаментов, обусловленные увеличением температуры многолетней мерзлоты (Shiklomanov et al., 2017)*

*Расчет по ансамблевому климатическому сценарному прогнозу CMIP5 для сценария RCP8.5*

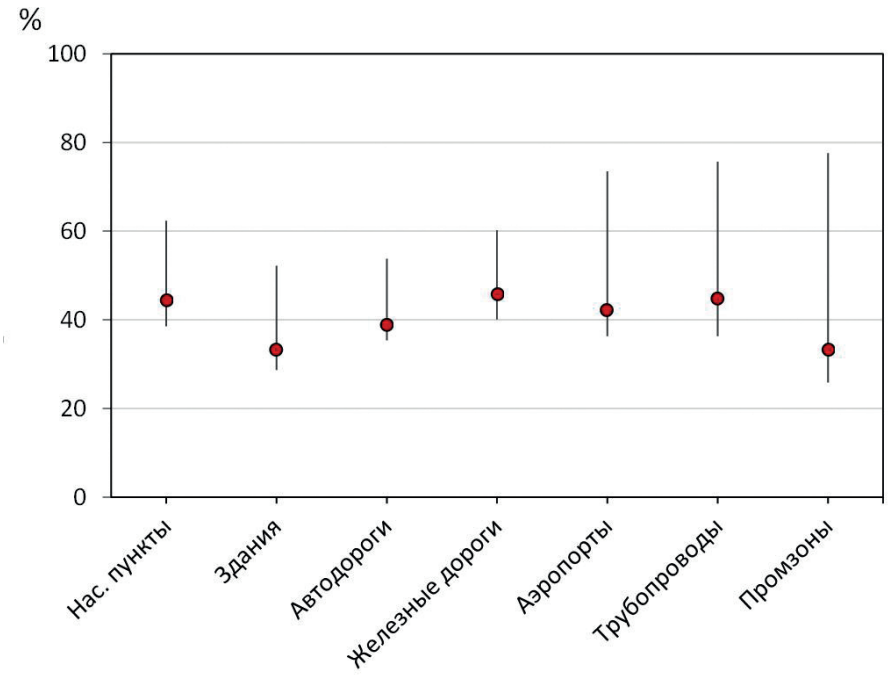



***Рис. 2.3.8.5*** *Доли различных видов инфраструктуры в криолитозоне Евразии, попадающей к середине XXI века (2041-2060 гг.) в области высокого геокриологического риска.*

*Расчет по ансамблевому климатическому сценарию RCP8.5. Вертикальными линиями обозначен диапазон изменения, обусловленный неопределенностями прогнозируемых значений среднегодовой температуры грунта и мощности СТС*

В зону высокого риска попадают экономически важные объекты, в том числе 1590 км трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», соединяющего г. Тайшет в Иркутской области и нефтеналивной порт Козьмино в заливе Находка; 1260 км магистральных трубопроводов в ЯНАО; 280 км железной дороги «Обская – Бованенково». В зону наибольшего риска попадают города Воркута и Новый Уренгой.

***Таблица 2.3.8.2***

*Прогнозируемый ущерб (средняя, мин./макс. оценки) от деградации многолетней мерзлоты к середине XXI века для жилой, промышленной и транспортной инфраструктуры (млрд долларов), а также его доля (%) в валовом региональном продукте (ВРП) на 2016 г. в административных регионах России. Расчет по ансамблю из шести моделей CMIP5 (CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR и NorESM1-M) для сценария RCP8.5*

| Регион | Ущерб для различных видов инфраструктуры | | | Доля от ВРП (2016) |
|---|---|---|---|---|
| | жилая | промышленная | транспортная | % |
| Республика Коми | 2,17 (2,17/2,17) | 0,83 (0,79/0,88) | 5,51 (5,51/5,51) | 2,2 (2,2/2,2) |
| НАО | 1,75 (0,01/1,75) | 0,86 (0,77/0,95) | 6,04 (5,46/6,61) | 5,0 (3,6/5,4) |
| ХМАО | 0,05 (0,0/0,82) | 0,0 (0,15/0,0) | 1,41 (1,41/1,41) | 0,1 (0,1/0,1) |
| ЯНАО | 9,11 (7,22/9,11) | 5,26 (4,23/6,28) | 37,96 (30,88/45,05) | 4,0 (3,2/4,6) |
| Красноярский край | 5,87 (0,01/7,83) | 0,11 (0,0/0,72) | 3,97 (3,94/4,00) | 0,8 (0,3/1,1) |
| Республика Саха (Якутия) | 1,69 (0,0/25,3) | 8,65 (5,48/11,82) | 10,93 (9,63/12,23) | 3,7 (2,6/8,5) |
| Камчатский край | 0,0 (0,0/0,0) | 0,04 (0,01/0,07) | 0,02 (0,01/0,03) | 0,1 (0,0/0,1) |
| Магаданская обл. | 0,08 (0,0/2,77) | 0,07 (0,0/0,56) | 0,82 (0,77/0,87) | 1,0 (0,8/4,2) |
| Чукотка | 0,01 (0,01/0,88) | 0,87 (0,48/1,17) | 1,02 (0,99/1,05) | 4,2 (3,3/6,9) |
| Все регионы | 20,71 (9,41/50,63) | 16,69 (11,77/22,60) | 67,67 (58,59/76,75) | 1,8 (1,3/2,5) |

В двух последующих работах (Streletskiy et al., 2019; Suter et al., 2019) были даны стоимостные оценки возможного повреждения инфраструктуры в криолитозоне северного полушария и России. В табл. 2.3.8.2 приведены прогнозы ущерба от деградации многолетней мерзлоты к середине XXI века с дифференциацией по трем типам инфраструктуры (промышленная, транспортная и жилая) для административных регионов России (Streletskiy et al., 2019). Расчеты проводились по ансамблю из шести моделей CMIP5 для сценария RCP8.5. Были использованы оценки стоимости существующей инфраструктуры, построенной на многолетней мерзлоте в каждом из регионов. В сумме по данным 2016 г. она оценивается в 248,6 млрд долларов, что со-

ставляет около 7,5% ВВП России за этот год. Жилая инфраструктура дает вклад менее четверти всей суммы и оценивается в 56,2 млрд долларов. Затем была рассчитана доля инфраструктуры, которая без мер по адаптации будет повреждена или утрачена из-за уменьшения несущей способности и неравномерной просадки мерзлоты к середине XXI века. Эта доля в стоимостном выражении и принималась за прогнозируемый ущерб. При расчете предполагалась линейная зависимость между плотностью размещения инфраструктуры и численностью населения. В действительности это не так, поскольку основной вклад в инфраструктуру вносит промышленность, подотрасли которой сильно отличаются между собой по показателям трудоемкости и фондоемкости.

Суммарный ущерб для всей инфраструктуры к середине XXI века оценивается в 105,07 млрд долларов, наибольшие доли вносят ЯНАО (52,33 млрд долларов) и Якутия (21,26 млрд долларов). Способность противостоять этим рискам и компенсировать прогнозируемый ущерб в значительной степени зависит от благосостояния конкретных регионов, в качестве его метрики можно использовать валовой региональный продукт (ВРП). Данные для административных регионов о том, какую долю ВРП составляет прогнозируемый ущерб, также приведены на рис. 2.3.8.6. Видно, что она изменяется в значительном диапазоне от 0,1 в Ханты-Мансийском АО и Камчатском Крае до 4,0 в Ненецком, Ямало-Ненецком и Чукотском АО.

В работе (Suter et al., 2019) рассматривалось изменение среднегодовых затрат на поддержание и воспроизводство инфраструктуры за счет сокращения периода ее эксплуатации в связи с деградацией многолетней мерзлоты. Согласно полученным оценкам, к середине XXI века в России они увеличатся на 27,5% и составят 6,63 млрд долларов. Деструктивному воздействию будет подвержено 32% всей инфраструктуры, стоимость которой оценивается в 40,339 млрд долларов.

В работе (Мельников и др., 2021) был оценен ущерб инфраструктуре в муниципальных образованиях на части криолитозоны, расположенной в АЗРФ. Согласно полученным оценкам, к середине XXI века ущерб для всей инфраструктуры составит 5-7 трлн. руб., для жилищного фонда – на порядок меньше, около 700 млрд руб.

Недостатком перечисленных работ является ограниченность первичной статистической информации о наличии и стоимости инфраструктуры. Из-за этого прогнозируемые величины ущерба заметно различаются даже в работах одного авторского коллектива, в зависимости от выбранных методик дооценки недостающих данных. Кроме того, учитывается лишь текущая стоимость инфраструктуры, при том что ее количество и стоимость неизбежно изменятся за прогнозный период при реализации крупных инвестиционных проектов в криолитозоне. Другим значимым упущением представляется неучет экономических механизмов снижения величины ожидаемого ущерба, например, инвестиций в создание систем термостабилизации грунтов.
Во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) были рассмотрены технические меры по адаптации инфраструктуры к увеличению температуры многолетней мерзлоты. Принятие решений по конкретным инфраструктурным объектам проиллюстрировано на рис. 2.3.8.6. Элементы, заключенные в закругленные фигуры, содержат неопределенности. К таковым относятся:

– сценарии эмиссии парниковых газов, поскольку они во многом зависят от будущего

мировой экономики и политики в отношении ограничения антропогенного воздействия на климат;

– вероятные будущие изменения климата, большие неопределенности связаны с ограниченной точностью используемых для их оценки климатических моделей;

– ранжирование криолитозоны по степени уязвимости при таянии многолетней мерзлоты, поскольку нет единого критерия для оценки такого рода рисков;

– проектируемая (еще не построенная) инфраструктура, поскольку конкретные решения зависят от меняющихся условий.

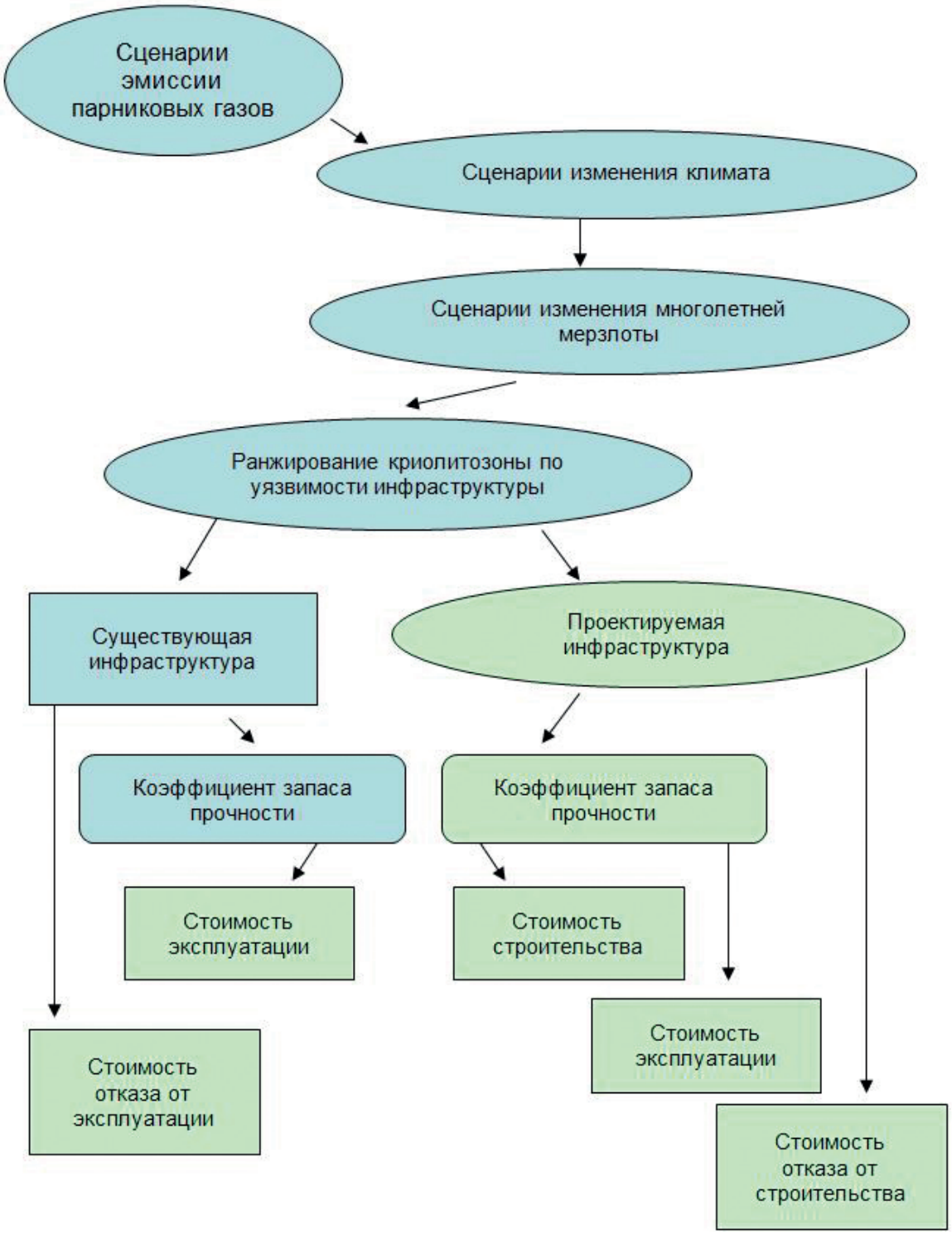



***Рис. 2.3.8.6*** *Схема оценки экономического ущерба от таяния многолетней мерзлоты*

На рис. 2.3.8.6 салатным цветом обозначены элементы, на которые изменение многолетней мерзлоты оказывает непосредственное влияние и которые могут быть модифицированы. Все остальные элементы либо не испытывают такого влияния, либо не могут быть изменены, и по этой причине их можно исключить из анализа.

Следует пояснить, что элементы «Существующая инфраструктура» и заложенный в ней «коэффициент запаса прочности» исключены, поскольку все их свойства уже предопределены, а возможность их модификации с целью адаптации к изменениям многолетней мерзлоты неявно учтена в элементе схемы «Стоимость эксплуатации».

Таким образом, для принятия решений о мерах адаптации на основе баланса рисков и потенциальных выгод, обусловленных таянием многолетней мерзлоты, формируются две независимые линии. Одна из них связана с существующей инфраструктурой и содержит лишь два элемента:

– стоимость эксплуатации конкретного объекта, которая включает также и цену его преобразования, например, усиления фундамента сооружения с тем, чтобы он мог выдержать вес объекта при ослаблении несущей способности многолетней мерзлоты;
– стоимость отказа от эксплуатации объекта, т.е. совокупные потери, которые возникнут в случае, если данный объект перестанет существовать и выполнять свои функции.

Вторая линия связана с проектируемой (еще непостроенной) инфраструктурой и, кроме вышеуказанных, содержит еще два элемента:

– коэффициент запаса прочности, увеличивая который можно строить объекты, которые будут сохранять стабильность даже в районах с относительно «слабой» многолетней мерзлотой;
– стоимость строительства объекта, которая определяется также и величиной коэффициента запаса прочности.

В анализе важно учитывать, что помимо принятия решения о строительстве нового объекта (или реконструкции существующего), всегда имеется альтернативная возможность отказа от строительства (ликвидации существующего) объекта, при том что выполняемые им функции либо прекращаются, либо передаются другим аналогичным объектам. Обоснованный выбор состоит в сравнении стоимости реализации прямого и альтернативного решения.

## Список литературы


**Анисимов О. А., Анохин Ю. А., Лавров С. А., Малкова Г. В., Павлов А. В., Романовский В. Е., Стрелецкий Д. А., Холодов А. Л., Шикломанов Н. И., 2012:** Континентальная многолетняя мерзлота. Методы изучения последствий изменений климата для природных систем. –М.: ВНИИГМИ. – С. 268-328.

**Анисимов О. А., Шерстюков А. Б., 2016:** Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. – Т. 20, № 2. – С. 90-99.

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (А. И. Бедрицкий и др., ред.). – М.: Росгидромет, том 1. – 230 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н., 2019:** Российская Арктика: Логика и парадоксы перемен // Проблемы прогнозирования. – Т. 30, № 6 (177). – С. 4-21.

**Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В., Бадина С. В., Дроздов Д. С., Дубровин В. А., Железняк М. Н., Садуртдинов М. Р., Сергеев Д. О., Остарков Н. А., Фалалеева А. А., Шелков Я. Ю., 2021:** Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – № 1. – С. 14-31. DOI: 10.31857/S0869780921010070

**Anisimov O., Zimov S., 2020:** Thawing permafrost and methane emission in Sberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling. Ambio. DOI 10.1007/s13280-020-01392-y

**Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D. A., Schoeneich P., Romanovsky V. E., Lewkowicz A. G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W. L., Christiansen H. H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A. B. K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H., 2019:** Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications, v. 10, № 1, p. 264.

**Gruber S., 2012:** Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere, v. 6 № 1, pp. 221-233.

**Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V. E., Nelson F. E., Etzelmüller B., Luoto M., 2018:** Degrading permafrost puts arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature Communications, v. 9, № 1, p. 5147.

**Huskey L., Maenpaa I., Pelyasov A., 2014:** Economic systems. Arctic human development report: Regional processes and global linkages/ Copenhagen: Rosendahls-Schultz Grafisk, pp. 151-182.

**Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., 2001:** Subsidence risk from thawing permafrost // Nature, v. 410, pp. 889-890.

**Orttung R. W., Anisimov O., Badina S., Burns C., Cho L., DiNapoli B., Jull M., Shaiman M., Shapovalova K., Silinsky L., Zhang E., Zhiltcova Y., 2020:** Measuring the sustainability of Russia's arctic cities. Ambio. DOI 10.1007/s13280-020-01395-9

**Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A., Swales T. B., Kokorev V. A., 2017:** Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections // Geographical Review, № 1, pp. 125-142.

**Simola H., Solanko L., 2017:** Overview of Russia's oil and gas sector // BOFIT Policy Brief, № 5, 34 p.

**Streletskiy D. A., Suter L., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O., 2019:** Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters, v. 14, № 2, p. 025003.

**Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N., 2019:** Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar arctic // Polar Geography, v. 42, № 4, pp. 267-286.

## 2.3.9 Морская деятельность

***А. А. Постнов, Г. В. Алексеев, А. И. Данилов, С. А. Солдатенко***

### 2.3.9.1 Неарктические моря и Баренцево море

Традиционно экономическая деятельность в открытом море и на прибрежных акваториях охватывает морское судоходство (в том числе трансокеанские перевозки), портовые погрузочно-разгрузочные операции, морское рыболовство. В последние десятилетия к ним добавились разведка, добыча и транспортировка минеральных ресурсов (в первую очередь – нефти и газа). Для этого на шельфах морей, иногда на значительном удалении от берега, сооружаются морские буровые и нефтяные платформы. Несмотря на развитие морских технологий, окружающая среда по-прежнему оказывает значительное влияние как на безопасность, так и на экономическую эффективность всех видов морской деятельности. Учет такого влияния является важным условием успешной реализации Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 августа 2019 года № 1930-р.

При стабильном климате субъекты морской деятельности так или иначе приспосабливаются к связанным с ней рискам. Однако по мере изменения климата и развития экономической деятельности на море увеличиваются, с одной стороны, повторяемость неблагоприятных и опасных явлений погоды, а с другой – возможные экономические потери, связанные с воздействием погодно-климатических условий на безопасность и экономическую эффективность морской деятельности.

В дальнейшем, по мнению многих экспертов, изменение климата приведет к росту повторяемости неблагоприятных условий погоды, в частности, штормовых ветров (Методы оценки последствий изменения климата, 2012). При этом в прибрежных зонах, где взаимодействуют атмосфера, суша и море, локальные градиенты атмосферного давления увеличиваются за счет различий в тепловых характеристиках воды и суши. Это способствует локальному усилению ветра и штормовой активности, вследствие чего в прибрежных зонах можно ожидать большей, по сравнению с внутриматериковыми районами, повторяемости экстремальных явлений.

С учетом наблюдающихся тенденций изменения климата возникает необходимость в разработке мер по адаптации морской деятельности к новым гидрометеорологическим условиям. Оценка экономической эффективности таких мер требует учета соотношения между возможными экономическими потерями от изменения погодно-климатических рисков, с одной стороны, а с другой – стоимостью мер адаптации к ним. При этом очевидно, что необходимо учитывать тенденции развития морской деятельности на тех или иных акваториях. С учетом всех этих факторов в целях обеспечения устойчивого развития прибрежных акваторий и территорий во многих странах разрабатываются комплексные подходы к адаптации морской деятельности к возрастающим погодно-климатическим и экологическим рискам в условиях изменения климата (Шаповалов и др., 2019).

**Морской транспорт, портовые операции, разведка и добыча нефти и газа**

Воздействие погодно-климатических факторов на морской транспорт и портовые операции обусловлено штормовым волнением, огра-

ничением видимости, колебаниями уровня моря и ледовыми условиями. В связи с этим сведения о текущем гидрометеорологическом режиме тех или иных акваторий включаются в лоции морей, а также публикуются в климатических справочниках и режимно-справочных пособиях[1], содержатся в информационных ресурсах государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2005 г. № 836. При оценке воздействия погодно-климатических факторов на морскую деятельность как в настоящем, так и в будущем важно учитывать не только «средние», наиболее вероятные, но и возможные экстремальные условия.

**Штормовое волнение**

Штормовое волнение ведет к заметному уменьшению скорости судна (Лубковский, 2009; Ермолаев и др., 1970). Так, при водоизмещении судна 15 тыс. тонн волны высотой 2,5 м уменьшают скорость хода на 10%, а волны высотой 7 м – на 35-40% (см. табл. 2.3.9.1). Кроме того, при плавании в штормовой зоне возникает угроза сохранности груза. Так, палубный груз может быть потерян или залит забортной водой, а груз в трюмах может прийти в негодность при попадании забортной воды во внутренние помещения. Сильная качка может повредить хрупкий груз, например, радиоаппаратуру или бытовую технику при их перевозке в контейнерах. Очевидно, что волнение особенно опасно для малых судов.

В зимний период при отрицательных температурах воздуха попадание забортной воды на палубу судна в штормовых условиях может приводить к обледенению палубы и надстроек не только в арктических, но и в неарктических морях. Поскольку обледенение создает угрозу для остойчивости судна, его команда вынуждена отвлекаться на удаление льда с надстроек и палубы.

***Таблица 2.3.9.1***

*Расчетные потери скорости хода судна водоизмещением 15 тыс. т при различной высоте волн (Лубковский, 2009)*

| Высота волн, м | 2,0–2,5 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|
| Потери скорости судна, % | 10 | 20 | 25–30 | 35–40 |

В портах штормовое волнение воздействует на суда только при отсутствии волнозащитных сооружений или в тех случаях, когда волны смещаются со стороны открытого входа в порт. Это может приводить к качке судов, стоящих у причальной стенки, и связанному с этим нестабильному положению грузовой палубы в пространстве, что осложняет погрузочно-разгрузочные операции. Кроме этого, штормовое волнение затрудняет вход судов в порт и выход из него, поскольку это часто сопряжено с проходом через узкое пространство между портовыми волнозащитными сооружениями.

На морских нефтяных и газовых месторождениях штормовое волнение увеличивает волно-

[1] При описании гидрометеорологических условий морей России в данном разделе использовались данные, содержащиеся в серии монографий «Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР»

вые нагрузки на морские буровые и нефтяные платформы и нефтяные терминалы, а также размывает морское дно, под которым проложены морские трубопроводы.

Сильный ветер ограничивает эффективность и безопасность погрузочно-разгрузочных работ путем воздействия на портовые краны и переносимые грузы. В частности, при раскачивании контейнера под влиянием ветра хрупкие грузы, включая бытовую электронную аппаратуру, могут быть повреждены. Во избежание этого скорость подъема и особенно опускания грузов приходится уменьшать, что увеличивает суммарное время обработки судна. При порывах ветра, превышающих предельные значения (зависящие от размеров и формы контейнеров, типа и высоты крана), операции по погрузке и разгрузке могут быть полностью прекращены.

По данным за 1970-1980 гг. (более поздние систематизированные оценки отсутствуют), повторяемость волнения с высотой волн более 3 м составляла в среднем за год от 5-7% на Черном до 12-20% на Японском море (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР). Многолетние тенденции к изменению средней скорости ветра и повторяемости штормового ветра различны для разных морей России. Так, на Балтийском море в последние десятилетия отмечалось увеличение повторяемости глубоких циклонов (Росгидромет, 2014), а следовательно, штормов, в том числе и в зимний период, когда они особенно опасны для мореплавания. Однако, как показывают сценарные оценки будущего изменения климата на территории России (Росгидромет, 2014), в 2034-2053 гг. и в более поздний период, эта тенденция изменится на противоположную, и число дней с циклонами будет уменьшаться. Вместе с тем увеличится характерный диаметр циклонов, а, значит, скорость их смещения уменьшится. В результате возрастет продолжительность штормовых условий, связанных с каждым отдельным циклоном. Каким образом эти противоречивые факторы (уменьшение повторяемости циклонов при одновременном увеличении периода нахождения каждого их них над акваторией) повлияют на волновой режим Балтийского моря, остается неясным.

На прилегающей к российскому побережью акватории Баренцева моря ожидается уменьшение повторяемости циклонов на 30%. В связи с этим можно ожидать, что на Баренцевом море уменьшится и число дней со штормовой погодой, что благоприятно скажется на безопасности и эффективности морских транспортных и портовых операций.

На Черном, Азовском и дальневосточных морях ожидается увеличение среднего диаметра циклонов, что будет способствовать увеличению продолжительности штормовой погоды. Дополнительно на дальневосточных морях в связи с ожидаемым увеличением температуры морской воды и связанных с этим увеличением площади свободной ото льда акватории и продолжительности безледного периода зимой, ожидается интенсификация циклогенеза и, следовательно, осложнение условий для навигации и портовых операций (Росгидромет, 2014; Методы оценки последствий изменения климата, 2012).

В океанических районах, которые также важны для морских внешнеторговых перевозок России, ожидается постепенное смещение траекторий циклонов к полюсу и ослабление глобальной циклонической активности в целом (Росгидромет, 2014). Это будет способствовать улучшению гидрометеорологических условий

плавания (в первую очередь – в части ветрового волнения) в умеренных широтах океанов, но, возможно, осложнит условия плавания в полярных широтах.

**Ограниченная видимость**

Ограниченная видимость вследствие тумана приводит к нерациональному расходованию судового времени (Rodrigue, 2017), поскольку в районах интенсивного судоходства и на подходах к портам суда вынуждены существенно замедлять ход или даже останавливаться для того, чтобы избежать столкновения. В портах ограничение видимости менее 50 м из-за тумана или сильных осадков (особенно в виде ливневого снега) приводит к замедлению или приостановке погрузочно-разгрузочных работ с помощью портовых кранов (Rodrigue, 2017; Новиков, Бухарицин, 2009). Туманы могут влиять на условия входа и выхода судов из порта, поскольку во многих портах эти операции производятся при визуальном контроле положения судна относительно берега и препятствий.

По данным за 1970-1980-е гг. (систематизированные оценки за более поздний период отсутствуют), средняя годовая повторяемость туманов на акваториях неарктических морей России весьма различна и колеблется от 1-5% для Черного до 6-10% для Балтийского и Белого морей (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР). Наиболее вероятны густые туманы в портах Мурманска в зимний период (туманы парения при затоке холодных воздушных масс) и Владивостока в летний период года. Средняя продолжительность туманов составляет 3-6 часов. Можно ожидать, что наблюдающаяся на Балтийском, Черном, Азовском и Каспийском морях тенденция к повышению температуры воды и связанному с этим увеличению продолжительности безледного периода будет способствовать повышению повторяемости туманов в осенне-зимний период.

Ухудшение видимости на море может быть связано не только с туманом, но и с низкой (с нижней границей менее 100 м) слоистой облачностью (когда облака на горизонте зрительно сливаются с морем) или интенсивными осадками, особенно ливневым снегом (Ермолаев и др., 1970), образованию которых способствует наличие открытой воды в зимний период. В ливневом снеге при температуре воздуха в приводном слое около нуля градусов ухудшается радиолокационная обзорность, поскольку тающие снежинки создают обширные зоны повышенной радиолокационной отражаемости, на фоне которых легко не заметить небольшие объекты (суда, острова) на экране судовых радиолокаторов. Такие погодные условия характерны для тыловых частей циклонов и холодных фронтов. Как отмечалось выше, увеличение повторяемости циклогенеза ожидается над дальневосточными морями, и, следовательно, можно ожидать там увеличения повторяемости ситуаций с плохими видимостью и радиолокационной обзорностью, что может привести к уменьшению скорости движения судов в районах интенсивной навигации и, следовательно, к потере судового времени.

**Колебания уровня моря**

Колебания уровня моря в прибрежной зоне вызваны сгонно-нагонными явлениями, обусловленными сильными продолжительными ветрами в отмелых прибрежных зонах. Для судоходства и работы портов наиболее опасны сгонные явления (Ермолаев и др., 1970), когда уровень моря может в течение нескольких часов снизиться от несколько десятков сантиметров до 1-1,5 м, что способно привести к невоз-

можности прохода судов по морским каналам. Опасны также и нагоны, особенно в тех случаях, когда в результате подъема воды образуются новые, не отмеченные навигационными знаками отмелые участки, а затопление берегов приводит к изменению их очертаний, что усложняет ориентацию маломерных судов на акватории при каботажном (прибрежном) плавании. При песчаном дне интенсивные сгоны и нагоны могут приводить к переформированию топографии дна, заносу судоходных каналов песчаными отложениями и, как следствие, к необходимости проведения внеплановых работ по их углублению.

В портах при интенсивном сгоне глубина у причальных стенок и на акватории в целом резко уменьшается, что может привести к посадке судов на мель или невозможности выхода судна из порта (если глубина в каналах меньше глубины у причалов). При нагонах низкие причальные стенки могут оказаться затопленными и визуально плохо различимыми, из-за чего суда могут столкнуться с ними при швартовке. Кроме того, как при нагонах, так и при сгонах в районах портов возникают сильные поверхностные течения, нетипичные для них в другое время, которые могут создать опасность для длинномерных судов (танкеров и контейнеровозов) при их движении в узких каналах на подходе к порту и на входе в него. Дополнительно при нагонах возникает опасность подтопления и порчи складированных на причалах грузов.

В неарктических морях России ветровые нагоны наиболее характерны для восточного побережья Азовского моря и Невской губы Финского залива, а также северо-западного побережья Каспийского моря (Методы оценки последствий изменения климата, 2012). Оценка возможных изменений повторяемости сгонно-нагонных явлений в ближайшие десятилетия в связи с изменением климата представляется затруднительной. Можно лишь полагать, что за счет увеличения продолжительности безледного периода сгонно-нагонные явления станут наблюдаться и в зимний период, в который они ранее не возникали из-за ледостава. В районах, где ожидается увеличение продолжительности периодов со штормовыми условиями за счет увеличения размеров циклонов, возможно увеличение повторяемости и продолжительности сгонно-нагонных явлений.

Еще одной значительной проблемой в ближайшие десятилетия станет повышение среднего уровня моря. Для европейских морей России темпы роста уровня моря составляют от 1-2 мм в год на Черном и Азовском морях (Росгидромет, 2014) до 6 мм в Финском заливе (за счет совместного влияния повышения уровня моря и локального опускания земной коры, Росгидромет, 2014). В Черном и Азовском морях к концу XXI столетия уровень моря может вырасти на 0,5-0,7 м (Росгидромет, 2014) и купирование негативного влияния такого роста уровня на портовую инфраструктуру и условия прибрежного плавания станет актуальным. Одновременно ожидаемое в соответствии с одним из сценариев (Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря, 2016) понижение уровня Каспийского моря негативно скажется на условиях плавания в мелководном Северном Каспии, а также осложнит доступ к буровым и нефтяным платформам морским путем и вынудит осуществлять их снабжение по воздуху, что существенно дороже.

**Температура и влажность воздуха**

Температура и влажность воздуха воздействуют на сохранность перевозимых судами гру-

зов, особенно продуктов питания (фруктов). Существует зависимость между температурой и влажностью воздуха в судовых трюмах и за бортом. Поэтому в ряде случаев выгоднее увеличивать длину маршрута с тем, чтобы большая его часть проходила в районах с благоприятными для сохранности грузов метеоусловиями. Очевидно, что из-за ограниченных размеров морей эта рекомендация применима преимущественно к трансокеанским, в частности, трансатлантическим перевозкам.

**Ледовый покров**

Ледовый покров значительно ограничивает возможности свободного плавания судов в некоторых неарктических морях в зимний период. При этом длительность ледового периода существенно различается от года к году, что связано с метеорологическими условиями зимних месяцев в конкретные годы (Методы оценки последствий изменения климата, 2012). Тяжелые ледовые условия, особенно при сплоченности льда свыше 70-80% и его толщине свыше 100 см, существенно ограничивают работу портов или даже приводят к полному ее прекращению. Большую роль играет ледовый класс судов, обрабатываемых в порту, а также наличие ледоколов для проводки судов в порт и поддержания акватории порта чистой ото льда. Чем более высокий ледовый класс имеют используемые суда и больше доступность ледоколов, тем в меньшей степени порт подвержен рискам, связанным с ледовыми условиями. Однако затраты на эксплуатацию ледоколов увеличивают себестоимость обработки судов в порту.

В зимний период для подводных трубопроводов в мелководных районах Каспийского моря большую опасность создают стамухи, основания которых могут располагаться на 1-2 м ниже уровня дна. При движении таких стамух под воздействием ветра они могут деформировать и даже разрушать мелко заложенные морские трубопроводы.

**Морское рыболовство**

Можно ожидать, что изменение климата и обусловленных им характеристик морской среды окажет значительное влияние и на морское рыболовство. Для рыболовной отрасли важнейшими погодно-климатическими факторами являются температура и соленость морских вод, а также концентрация биогенных веществ и растворенного кислорода и, в некоторых случаях, кислотность морской среды. Эти факторы во многом определяют кормовую базу в районах нереста, нагула и миграции промысловых видов рыб (Левасту, Хела, 1974) и тем самым формируют ареалы их распространения и промысловые запасы, а выживаемость икринок многих видов рыб напрямую зависит от преобладающей температуры воды в конкретный год (White Sea. Ecology and Environment, 2001).

В океане районы интенсивного рыболовства сосредоточены в районах апвеллинга и вертикального конвективного перемешивания океанских вод. Эти условия приводят к поступлению к поверхности воды биогенных веществ, которые участвуют в фотосинтезе и формируют первичную продукцию, которая является основой пищевой цепи и в конечном счете влияет на численность промысловых видов рыб. В свою очередь, районы апвеллинга связаны с конфигурацией полей ветра и плотности морских вод, которые по мере изменения климата будут менять свои характеристики и смещаться в пространстве. В результате, как показывают математические модели, изменение климата приведет к смещению ареалов распростране-

ния рыб относительно их современного расположения (Daw et al., 2009; Roessig et al., 2004), что может вызвать необходимость изменения районов промысла, в первую очередь – океанического.

В морях приток биогенных веществ в приповерхностный слой фотосинтеза зависит от интенсивности конвективного перемешивания, определяемой вертикальной стратификацией температуры и солености, а также от притока биогенных веществ с речным стоком. Очевидно, что будущие изменения климата скажутся как на температуре вод, так и на объеме речного стока, а значит, на солености и притоке биогенных веществ. Расчеты по специализированным моделям «климат – состояние морской среды – рыбное поголовье» (Daw et al., 2009; Roessig et al., 2004) показывают, что изменение климата приведет к упомянутой выше миграции отдельных видов рыб в районы с более благоприятными условиями, а при резком изменении условий окружающей среды – к сокращению поголовья.

В частности, на Балтийском море ожидаемые повышение температуры и понижение солености вод приведут к ослаблению вертикального обмена, эвтрофикации и увеличению площади областей с гипоксией. Начиная с 1970-х гг. мягкие зимы и вызванные ими ослабление конвекции и понижение содержания кислорода в глубинных слоях Балтийского моря уже привели к сокращению запасов основных промысловых видов рыб: трески, сельди, шпрот (Eero, 2012). Одновременно в прибрежных районах Калининградской области процессы эвтрофикации и понижения солености приводят к увеличению площади водной растительности, что способствует росту популяции карповых видов рыб (Росгидромет, 2014).

В Азовском море наметившаяся тенденция к уменьшению солености явилась благоприятным фактором для роста поголовья рыб пресноводного комплекса, улов которых в результате осолонения Азовского моря в конце 1970-х гг. катастрофически упал (Росгидромет, 2014). Благоприятными для рыбного хозяйства могут оказаться ожидаемый подъем уровня моря в устье р. Кубань и образование там мелководного залива с условиями, пригодными для рыборазведения.

### 2.3.9.2 Арктические моря и Северный морской путь

Настоящее время характеризуется все возрастающим интересом к Арктике со стороны многих стран, даже тех, которые не принадлежат к категории арктических. Это связано прежде всего с ресурсным потенциалом и транспортным значением, которыми обладает Арктика, а с другой стороны, с отсутствием признанной и нормативно оформленной демаркации международных северных морских пространств и арктического шельфа.

Российская Арктика обладает уникальной транспортной сетью с портами, расположенными в непосредственной близости к перспективным месторождениям нефти и газа на шельфе и к рынкам Европы и Америки. Морская деятельность (грузоперевозки, поиск, разведка и освоение месторождений нефти и газа на шельфе Арктики, лов рыбы и иных морепродуктов), в том числе оборонная, морские экосистемы, вследствие особенностей изменения климата Арктики, оказались сегодня в зоне климатических рисков (Васильцов и др., 2021; Солдатенко и др., 2018).

**Арктическая морская транспортная система**

Арктическая морская транспортная система включает Северный морской путь (СМП) – исторически сложившуюся национальную транспортную коммуникацию Российской Федерации. Ожидается, что сокращение площади и толщины летних морских льдов улучшит условия судоходства по Северному морскому пути. На эталонном маршруте Роттердам – Йокогама при использовании СМП расстояние сокращается на 34% по сравнению с южным путем. Прогнозируемое потепление повышает интерес грузоперевозчиков к арктическим трассам. Развивается освоение месторождений полезных ископаемых в арктической зоне, что создает предпосылки для роста объемов перевозок по СМП. Ввод в строй заводов по сжижению газа «Ямал СПГ», «Арктик СПГ-2» и Новопортовского месторождения потребует заход в Обскую губу танкеров-газовозов и нефтяных танкеров. Для безопасного плавания по СМП необходимо надежное ледокольное обеспечение. Поэтому развитие ледокольного флота рассматривается как необходимое условие функционирования СМП в настоящем и будущем (Кашка и др., 2021; Рукша и др., 2016). И в России, и за рубежом оживление транзита по Северному морскому пути считают вполне реальным, особенно в ожидании дальнейшего изменения климата. По прогнозам экспертов, уже через 50 лет Арктика может стать одним из основных источников энергоресурсов и ключевым транспортным узлом планеты (Brazovskaia et al., 2021; Carayannis et al., 2021; Morgunova, 2020).

Обсуждается вопрос о перспективности СМП как альтернативного морского маршрута, связывающего Европу и Азию, в сравнении с традиционными маршрутами через Суэцкий и Панамский каналы. Помимо ожидаемого улучшения навигационной обстановки на СМП, двумя другими важнейшими факторами, определяющими преимущества того или иного маршрута, являются ледокольный сбор на СМП и бункерные цены. В частности, было показано, что при сокращении ледокольного сбора на 50% СМП становится прибыльным при длительности навигационного сезона три – шесть месяцев и низких бункерных ценах, однако не может конкурировать с Суэцким каналом. При сокращении ледокольного сбора на 85% и низких бункерных ценах оба маршрута становятся в равной степени привлекательными при длительности навигационного сезона три месяца; при более продолжительном сезоне навигации транзит по СМП становится более выгодным. Наконец, при полном отсутствии ледокольного сбора СМП становится конкурентоспособным во всех упомянутых выше сценариях (Moe, 2020; Theocharis et al., 2019).

Ряд ученых (Rodrigue, 2020; Zhao, Hu, 2016; Zhu et al., 2018) полагают ожидания развития арктического судоходства слишком оптимистическими и проблематичными в плане получения экономической и коммерческой выгоды, если оно не будет регулярным и круглогодичным. Они указывают, что вскрытие арктических морей на какое-то время летом означает, что большую часть года вероятные маршруты будут по-прежнему закрыты либо плавание по ним будет сопряжено со значительными трудностями. В этих случаях возможно прохождение только отдельных судов, караванов, экспедиций, но не регулярное судоходство. По подсчетам группы американских и канадских исследователей и экспертов, к 2030 году через Арктику будет, возможно, ходить примерно 2, а к 2050 году – 5% судов от уровня современного международного судоходства (Boylan, Elsberry, 2020; Maritime, 2050: Navigating the Future, 2019).

При сохранении существующего тренда климатических изменений ледовые условия на трассах СМП могут заметно измениться. Наблюдающееся сокращение льда наиболее ярко проявляется в окраинных морях российской Арктики, с наиболее заметным уменьшением в летний сезон. Очень вероятным является полное очищение трасс ото льда в теплый период года. Однако в зимний период лед будет наблюдаться повсеместно. Средняя толщина ледяного покрова уменьшится главным образом вследствие практического исчезновения двухлетних льдов, в определенной степени за счет некоторого уменьшения толщины однолетнего льда. Однако экстремальные толщины однолетних льдов могут достигать в отдельные годы значений близких к современным (в локальных районах). Сохранится, а возможно, несколько возрастет, вследствие усиления ветров, вероятность сильных сжатий льда, особенно в прибрежных зонах и ледяных массивах. Вероятно увеличение торосистости ледяного покрова вследствие усиления ветровой активности. Основные морфометрические параметры торосов и стамух изменятся незначительно. Сохранится вероятность появления айсбергов в северных частях арктических морей (Данилов и др., 2014).

Один из ключевых вопросов в условиях ожидаемых изменений климата – будущее ледокольного флота. Его развитие определяется прежде всего экономической целесообразностью освоения ресурсов арктического шельфа и перевозок по трассам СМП. Облегчение доступа судов в высокоширотные районы, рост экономической активности, превращение СМП в круглогодично действующую транспортную систему при сохранении морских льдов на трассах СМП большую часть года и вероятности возникновения сложных ледовых условий, безусловно, требуют сохранения и развития российского ледокольного флота (Кашка и др., 2016). Примером может служить зима 2003 г., когда в условиях уже теплеющей Арктики в юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) наблюдались исключительно сложные ледовые условия, затруднившие грузовые операции у Варандейского терминала, а в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения наблюдались десятки айсбергов (масса одного из них достигала 3,7 млн т). Обеспечение грузовых операций в Варандейском терминале потребовало тогда привлечение атомного ледокола. Причиной сложных ледовых условий стали устойчивые и продолжительные северные ветры, вызвавшие в относительно мелководной части Печорского моря мощное торошение и сжатия. Обеспечение добычи и круглогодичная транспортировка углеводородов в районах, подобных Приновоземельскому шельфу, безусловно, потребуют серьезной ледокольной поддержки (Кашка и др., 2021).

**Освоение ресурсов арктического шельфа**

Одной из наиболее важных причин, обусловливающих непрерывно возрастающий интерес к Арктике как арктических, так и неарктических стран, является наличие в регионе огромных запасов нефти, природного газа и минеральных ресурсов. За прошедшие 45 лет из арктических недр извлечены гигантские объемы углеводородов, на 1 декабря 2015 г. превысившие 20 млрд т нефтяного эквивалента, при этом около 86,4% указанного объема добыто в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). В углеводородах, добываемых АЗРФ, превалирует газ, а подавляющая часть нефти и газа добыта на суше (Лаверов и др., 2016).

Морские проекты по освоению арктического шельфа включают надводные и подводные добычные комплексы, отгрузочные термина-

лы, подводные трубопроводы, терминалы для обслуживания вертолетов, а также прибрежную инфраструктуру (накопители, портовые сооружения и пр.). Основными районами добычи нефти, газоконденсата в среднесрочной перспективе являются Баренцево и Карское моря. В Печорском море была установлена эксплуатационно-буровая платформа на нефтяном месторождении «Приразломное», функционирует морской ледостойкий отгрузочный Варандейский терминал с подводным трубопроводом. Проложены ветки подводного газопровода с п-ва Ямал через Байдарацкую губу.

Сложные природно-климатические условия арктического шельфа создают высокие природные риски для безопасности морской инфраструктуры, увеличивают стоимость проектов. Это неблагоприятные метеорологические условия: низкие температуры, вероятность сильных ветров, плохая видимость, атмосферное обледенение. Из гидрологических неблагоприятных условий следует выделить морское волнение, значительные колебания уровня моря вследствие приливов и штормовых нагонов, сильные течения.

Ледовые условия влекут за собой наиболее серьезные природные риски для морских сооружений в Арктике и очень существенно влияют на экономическую эффективность проектов. Ледовые нагрузки на сооружения зависят от массы воздействующего ледяного образования, его прочности и скорости движения. Наиболее серьезные риски обусловлены ледовыми явлениями: сильными ледовыми сжатиями, воздействием льда на сооружения в виде крупных и гигантских ледяных полей и айсбергов, торосов и стамух, навалами льда на берег, ледовой экзарацией дна, ранним ледообразованием и рядом других явлений. Существенна также продолжительность воздействия и возможные мультипликативные воздействия, например, сильное волнение при наличии разреженного льда (ледовый шторм).

Повышение уровня моря, рост числа и интенсивности штормов, увеличение продолжительности безледового периода в прибрежной зоне будут способствовать более интенсивному разрушению берегов, сложенных рыхлыми и льдистыми породами, что может угрожать прибрежной инфраструктуре. Изменения климата могут оказать на нефтегазовую отрасль и «эффекты второго порядка». Так, климатические изменения поставят под угрозу существование ряда видов животных, что может повлечь за собой принятие соответствующих природоохранных мер, в том числе затрагивающих функционирование нефтегазовой отрасли. В этих условиях авторы (Лаверов и др., 2016) считают, что «задержку с широкомасштабным освоением нефтегазовых ресурсов арктического шельфа нужно расценивать позитивно, так как она позволяет уберечь ранимую экосистему Арктики от неизбежных разливов нефти и сохранить государственный резерв углеводородов для будущих поколений, которые смогут применить более эффективные и безопасные технологии и технические средства нефтегазодобычи». Кроме того, (Petrick et al., 2017) нашли, что при нынешних ценах на углеводороды нефть и газ из прибрежных районов Европы в Арктике неконкурентоспособны на мировых рынках.

**Освоение морских биоресурсов**

Современный уровень исследований не позволяет достоверно определить степень влияния (негативного или позитивного) ожидаемых изменений климата на коммерческое рыболовство в Арктике. При этом известно, что изменение климата морской среды может суще-

ственно повлиять на миграцию промысловых рыб и, как следствие, на географию рыбного промысла (Christiansen et al., 2014; Jansen et al., 2016). Многие рыбы и киты питаются мелкими ракообразными, обитающими у кромки морского льда. Если граница льда отступит, то изменения в морских арктических экосистемах окажут прямое воздействие на добычу рыбы и традиционное питание жителей арктических территорий (Lam et al., 2014).

Лучше всего вопрос изменения путей миграции рыб исследован для Баренцева моря. География промысла и трески, и мойвы здесь обусловлена в основном колебаниями природных факторов, в том числе изменениями климата (Боровков и др., 2014). Климатический фактор сказывается посредством: 1) прогрева все большей площади вод, в результате чего запасы промысловых рыб имеют более широкие ареалы распространения, что особенно заметно для таких массовых видов, как треска и пикша; 2) увеличения потока солнечной радиации, попадающей на поверхность воды, свободной от ледового панциря; это способствует росту продукции биомассы автотрофов (одноклеточных морских водорослей) и последующему росту биомассы на всех уровнях трофической пирамиды (IPCC, 2014). Поэтому в Баренцевом море для промысловых рыб, большинство из которых – активные хищники, также отмечается рост их запаса и вылова (ICES, 2020).

Таким образом, одно из важнейших следствий изменения климата – сдвиги границ ареалов промысловых видов рыб, что влечет за собой смену районов дислокации промыслового флота и, как следствие, перераспределение промысловых нагрузок на морские экосистемы. Продолжительный приток более теплых и соленых атлантических вод в Баренцево море привел к сдвигу границ ареалов трески и пикши в северо-восточном направлении (Кровнин и др., 2019). Ареалы теплолюбивых видов будут расширяться далее в северные и восточные районы, если тенденция потепления вод Баренцева моря сохранится.

Изменение маршрутов миграции промысловых рыб может изменить географию арктического рыболовства с возможным последующим конфликтом интересов двух ключевых секторов арктической экономики (коммерческого рыболовства и добычи углеводородов). Климатические изменения морской среды могут оказать решающее влияние на миграции промысловых рыб и, как следствие, на географию рыбного промысла.

## Климатические изменения и международно-правовой режим морской деятельности в Арктике

Основополагающий документ, определяющий международно-правовой режим морских пространств Мирового океана, включая Северный Ледовитый океан, – Конвенция ООН по морскому праву, ратифицированная большинством стран. США единственная арктическая страна, не ратифицировавшая Конвенцию, что позволяет ей занимать по ряду арктических проблем особую позицию. Статья 234 Конвенции прямо связывает морскую транспортную деятельность в высокоширотной экономической зоне с особенностями климата Арктики, а именно – с ледяным покровом. Международно-правовой режим большинства других видов морской деятельности не связывается непосредственно с климатическими условиями и их изменениями. Границы территориальных морей исключительной экономической зоны, а также внешняя граница континентального

шельфа России отсчитываются от исходных линий материка и островов. Исходные линии, связанные с береговой линией, в ряде случаев могут изменяться под воздействием природных факторов. Так, разрушение берегов, сложенных рыхлыми и льдистыми породами, может быть значительным: до десятков метров в год. Увеличение продолжительности безледного периода в сочетании с ростом ветроволновой активности и температуры воздуха может ускорить отступание берегов, изменить исходные линии и тем самым вызвать соответствующие изменения границ исключительной экономической зоны и внешней границы континентального шельфа. Масштабы подвижек отдельных береговых точек могут достигать нескольких километров за столетие (Данилов и др., 2014; Лаверов и др., 2016).

Согласно современным оценкам, более 90% минеральных ресурсов Северного Ледовитого океана находится в исключительной экономической зоне арктических стран. Таким образом, активизация ресурсных интересов других стран в результате улучшения ледовых условий может распространяться только на районы за пределами исключительной экономической зоны и континентального шельфа. Именно к этим районам могут быть применены такие понятия, как конкуренция и даже борьба за ресурсы Арктики. В соответствии со ст. 234 Конвенции ООН по морскому праву принципиальные изменения правил мореплавания в арктической исключительной экономической зоне России возможны только при кардинальном сокращении ледяного покрова. Перспективные оценки изменений ледовых условий в XXI веке показывают, что ледяной покров будет присутствовать на акватории Северного морского пути более шести месяцев в году (Мохов, Хон, 2015), что является основанием для регулирования Российской Федерацией мореплавания в своей арктической исключительной экономической зоне.

### 2.3.9.3 Направления адаптации

С учетом возможных изменений климата и их негативного воздействия на различные виды морской деятельности могут быть предложены следующие направления адаптации к ним.

В условиях ожидаемого увеличения повторяемости опасных явлений погоды (штормового волнения, сгонно-нагонных явлений) в качестве меры адаптации потребуется проведение дополнительных работ по укреплению (увеличению высоты) существующих волнозащитных сооружений в портах. Может появиться необходимость переноса или дополнительной защиты входов в порты (участков без волнозащитных сооружений, предназначенных для прохода судов) для того, чтобы избежать попадания высоких волн на акваторию порта в результате изменения преимущественного направления ветра при штормах. В мелководных районах с легкоподвижными донными отложениями (в частности, на восточном побережье Азовского моря) потребуется расширение парка земснарядов и других технических средств для дноуглубительных работ. Для обеспечения безопасности маломерных судов целесообразно развивать сеть малых портов-убежищ.

Темпы роста среднего уровня моря на акваториях российских морей (кроме Каспийского) невелики и в ближайшие десятилетия, вероятно, не создадут дополнительных проблем для портового хозяйства. Однако во второй половине XXI века скорее всего потребуется наращивание высоты причальных стенок во избежание их затопления. Целесообразно

учитывать это обстоятельство уже сейчас при проектировании новых и модификации старых портовых сооружений. Новые отметки высоты причальных стенок должны определяться с учетом темпов подъема среднего уровня моря и вероятной высоты нагонов (Rodrigue, 2017; Worth et al., 2006).

Одним из средств защиты от штормовых нагонов являются защитные сооружения с воротами, закрывающимися при угрозе возникновения нагонов и интенсивного ветрового волнения. Такие сооружения имеют очень высокую стоимость и поэтому должны служить не только для защиты портовых сооружений и судов в порту, но и прибрежных населенных пунктов. Опыт строительства и эксплуатации таких сооружений имеется в Великобритании (на р. Темза к северу от Лондона), Нидерландах (на судоходном канале, соединяющем порт Роттердам с Северным морем), Италии (на трех выходах из Венецианской лагуны в Адриатическое море). Единственным примером такого рода в Российской Федерации является комплекс защитных сооружений через Невскую губу в районе Санкт-Петербурга.

Для безопасного движения судов на подходах и акваториях портов в сложных гидрометеорологических условиях целесообразно оборудовать порты и прилегающие к ним прибрежные акватории современными средствами слежения за гидрометеорологической обстановкой (ветром, видимостью, волнением, уровнем моря, течениями) с тем, чтобы оперативно и обоснованно принимать управленческие решения в ходе проведения портовых операций. Для сокращения потери судового времени в условиях ограниченной видимости и радиолокационной обзорности необходимо совершенствовать автоматизированные системы судовождения, в наименьшей степени зависящие от погодных условий.

В неарктических морях уменьшение площади ледовых полей в зимний период облегчит морские транспортные операции и увеличит продолжительность навигации, а в некоторых районах сделает ее круглогодичной. Увеличение продолжительности навигации и соответствующее сокращение межнавигационного периода повысит эффективность работы портов, поскольку сократится время простоя портового оборудования (Rodrigue, 2017).

Изменение климата, вероятнее всего, приведет к изменению ареалов распространения биоресурсов, что может повлечь за собой изменение районов морского промысла. Если новые районы промысла окажутся на большем удалении от российских берегов, чем традиционные, их освоение потребует существенной перестройки логистики (увеличатся затраты на переход рыболовных судов к новым районам лова и доставку пойманной рыбы потребителям, придется осваивать новые рынки сбыта пойманной рыбы и других морепродуктов и т.п.). Изменение районов промысла может привести к спорам между странами о квотах вылова в их исключительных экономических зонах, а при уменьшении уловов – к увеличению безработицы среди жителей прибрежной зоны. Возможное изменение ареалов распространения видов рыб и морских млекопитающих, составляющих традиционное питание жителей арктических территорий, необходимо учитывать и при разработке мер по социально-экономической адаптации коренных народов Севера к изменению климата.

Поскольку благоприятные условия окружающей среды для различных видов рыб различ-

ны, уход из традиционных районов промысла одних видов рыб может сопровождаться появлением там других видов. Это создает возможность смены объектов промысла и видов преимущественной добычи в пределах традиционных районов лова (Roessig et al., 2004), но при этом может возникнуть необходимость изменения типов и технических характеристик орудий лова. Кроме того, в случае, если в результате изменения климата в традиционные районы лова переместятся виды, запрещенные или нежелательные к вылову, придется разрабатывать и внедрять технические новшества, уменьшающие вероятность нежелательного вылова охраняемых видов морских биоресурсов.

Морская деятельность в АЗРФ, подверженная погодным и климатическим рискам, в свою очередь, является источником возникновения экологических рисков. Разработка и транспортировка углеводородного сырья создает риски аварий, при этом суровые климатические и погодные условия, а также удаленность месторождений от существующей инфраструктуры, затрудняют выполнение рекультивационных работ. Имеющиеся технологии сбора нефти с поверхности в условиях высоких волн и суровых погодных условий оказываются малоэффективными. Особо сложной проблемой являются разливы нефти на лед и подо льдом. Выбросы двигательных установок, факельное сжигание попутного газа, утечки метана в процессе добычи и транспортировки углеводородов сопровождаются выбросами парниковых газов. Объемы неконтролируемых выбросов парниковых газов при глубоководном бурении намного превосходят те, что имеют место при разработке месторождений на суше и при малой глубине моря в силу существенно больших энергетических затрат. К тому же, чем дальше от берега находится буровая установка, тем больше затраты на перевозку побочных продуктов для последующей утилизации.

Развитие российского ледокольного флота является важным направлением адаптации к изменениям климата, в результате которых облегчается доступ в высокие широты и возрастает активность, в том числе на трассах СМП (Кашка и др., 2016).

## Список литературы


**Боровков В. А., Карсаков А. Л., Ярагина Н. Ф., Анциферов М. Ю., Ившин В. А., 2014:** Эффекты современных изменений климата в распределении промысловых скоплений северо-восточной арктической трески в период нагула // Вопросы промысловой океанологии. – № 11. – С. 61-76.

**Васильцов В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В., 2021:** Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий // Арктика: экология и экономика. – Т. 11, № 3. – С. 341-352. DOI:10.25283/2223-4594-2021-3-341-352.

**Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря, 2016:** Моделирование и прогноз. – М.: Триада лтд. – 378 с.

**Воздействие потепления в Арктике, 2004:** – Кэмбридж, Издательство Кембриджского университета, 2004. – 140 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5. Азовское море, 1991:** – СПб.: Гидрометеоиздат. – 235 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море, 1991:** Вып. 1, Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 431 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 6. Каспийское море, 1992:** Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 359 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 3. Балтийское море, 1992:** Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 447 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 2. Белое море, 1991:** Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 240 с.

**Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том VIII. Японское море, 2003:** Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 394 с.

**Данилов А. И., Алексеев Г. В., Клепиков А. В., 2014:** Последствия изменения климата для морской деятельности в Арктике // Лед и снег. – № 3. – С. 91-99.

**Ермолаев Г. Г., Андронов Л. П., Зотеев Е. С., Кирин Ю. П., Черниев Л. Ф., 1970:** Морское судовождение. – М.: Издательство «Транспорт». – 368 с.

**Кашка М. М., Ирлица Л. А., Ефанская Е. А., Матвиишина К. А., Головинский С. А., 2021:** Роль атомного ледокольного флота в достижении национальной задачи по увеличению объема грузопотока в акватории Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. – Т. 11, № 1. – С. 101-110. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-101-110.

**Кашка М. М., Смирнов А. А., Головинский С. А., Воробьев В. М., Рыжков А. В., Бабич Е. М., 2016:** Перспективы развития атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. – № 3 (23). – С. 98-107.

**Кровнин А. С., Мельников С. П., Никитенко А. И., Мурый Г. П., 2019:** Влияние современных изменений климата на сообщества морских рыб в североатлантическом регионе // Ученые записки РГГМУ. – № 56. – С. 110-125.

**Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., 2016:** Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. – № 2 (22). – С. 4-13.

**Левасту Т., Хела И., 1974:** Промысловая океанография. – Л.: Гидрометеоиздат. – 296 с.

**Лубковский В. К., 2009:** Определение ветроволновых потерь скорости судов смешанного плавания с измерением параметров волнения ортогонально-линеечным волномером: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск. – 153 с.

**Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем, 2012:** – М.: Росгидромет. – 512 с.

**Мохов И. И., Хон В. Ч., 2015:** Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. – № 2 (18). – С. 88-95.

**Новиков В. И., Бухарицин П. И., 2009:** Влияние гидрометеорологических факторов на работу портовых комплексов Астраханской области // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – № 2. – С. 73-81.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета о об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Шаповалов С. М., Костяная Е. А., Костяная Е. В., Костяной А. Г., 2019:** Устойчивое развитие на Южных

морях. – М.: Научно-координационный океанологический центр ИОРАН, 67 с.

**Рукша В. В., Головинский С. А., Белкин М. С., 2016:** Ледокольное обеспечение крупнейших национальных арктических углеводородных проектов // Арктика: экология и экономика. – № 4 (24). – С. 109-113.

**Солдатенко С. А., Алексеев Г. В., Иванов Н. Е., Вязилова А. Е., Харланенкова Н. Е., 2018:** Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и хозяйственных систем морской арктической зоне Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики. – Т. 64, № 1. – С. 55-70.

**Boylan B. M., Elsberry D. T., 2020:** Increased Maritime Traffic in the Arctic: Implications for International Cooperation and Security. Center for Arctic Policy Studies, International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, 20 p.

**Brazovskaia V., Gutman S., Zaytsev A., 2021:** Potential Impact of Renewable Energy on the Sustainable Development of Russian Arctic Territories // Energies, v. 14, pp. 1-19. https://doi.org/10.3390/en14123691.

**Carayannis E. G, Ilinova A., Cherepovitsyn A., 2021:** The Future of Energy and the Case of the Arctic Offshore: The Role of Strategic Management // Journal of Marine Science and Engineering, v. 9, № 2, pp. 1-20. https://doi.org/10.3390/jmse9020134.

**Christiansen J., Mecklenburg K., Karamushko O., 2014:** Arctic marine fishes and their fisheries in light of global change // Global Change Biology, v. 20, pp. 352-359.

**Daw T., Adger W. N., Brown K., Badjeck M.-C., 2009:** "Climate Change and Capture Fisheries: Potential Impacts, Adaptation and Mitigation", in K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (eds.), Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge // FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, № 530, FAO, Rome, pp. 107-150.

**Eero Aro, 2012:** Keynote: Fish and Fisheries in Go F. The main driving forces on the dynamics of fish resources in the Gulf of Finland, and the state of the key stocks. Presentation at "The trilateral cooperation for the Gulf of Finland", Workshop on Fish and Fisheries, 27-28 February 2012.

**ICES, 2020:** Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR). ICES Scientific Reports. 2:30. 206 pp. http://doi.org/10.17895/ices.pub.5998.

**IPCC, 2014:** Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

**Jansen T., Post S., Kristiansen T., Óskarsson G. J., Boje J., MacKenzie B. R., Broberg M., Siegstad H., 2016:** Ocean warming expands habitat of a rich natural resource and benefits a national economy // Ecological Applications, v. 26, pp. 2021-2032.

**Lam V. W. Y., Cheung W. W. L., Sumaila U. R., 2014:** Marine capture fisheries in the Arctic: Winners or losers under climate change and ocean acidification? // Fish and Fisheries, v. 17, pp. 335-357/

**Maritime 2050:** Navigating the Future. Department for Transport. London, 2019, 52 pp.

**Moe A., 2020:** A new Russian policy for the Northern sea route? State interests, key stakeholders and economic opportunities in changing times // The Polar Journal, v. 10, № 2, pp. 209-227. https://doi.org/10.1080/2154896X.2020.1799611

**Morgunova M., 2020:** Why is exploitation of Arctic offshore oil and natural gas resources ongoing? A multi-level perspective on the cases of Norway and Russia // The Polar Journal, v. 10, № 1, pp. 64-82. https://doi.org/10.1080/2154896X.2020.1757823).

**Petrick S., Riemann-Campe K., Hoog S., Growitsch C., Schwind H., Gerdes R., Rehdanz K., 2017:** Climate change, future Arctic Sea ice, and the competitiveness of European Arctic offshore oil and gas production on world markets. Ambio, v. 46, pp. 410-422.

**Rodrigue J.-P., 2017:** The Geography of Transport Systems / Fourth addition – New York, 440 p.

**Rodrigue J-P., 2020:** The Geography of Transport Systems. – New York: Routledge, 456 p.

**Roessig J. M., Woodley C. M., Cech J. J., Hansen L. J., 2004:** Effects of Global Climate Change on Marine and Estuarine Fishes and Fisheries // Reviews in Fish Biology and Fisheries, v. 14, pp. 251-275.

**Theocharis D., Rodrigues V. S., Pettit S., Haider J., 2019:** Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 129, pp. 111-135.

**Zhao H., Hu H., 2016:** Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example. Transportation Research Record // Journal of the Transportation Research Board, v. 2549, № 1, pp. 78-85.

**Zhu S., Fu X., Ng A. K. Y., Luo M., Ge Y-E., 2018:** The environmental costs and economic implications of container shipping on the Northern Sea Route // Maritime Policy and Management, v. 45, pp. 419-421.

**White Sea. Ecology and Environment, 2001:** Edited by V. Berger and S. Dahle. – St. Peterburg – Tramso: Derzavets Publisher, 157 p.

**Worth K., Weisse R., Storch H., 2006:** Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models // Ocean Dynamics, v. 56, pp. 3-15.

### 2.3.10 Туризм и рекреация

***М. В. Клюева***

В XX веке туризм стал глобальной экономической отраслью. По данным ежегодного исследования Всемирного совета по туризму и путешествиям (ВСТП) с участием экспертов Oxford Economics, за 2019 год сектор туризма и путешествий вырос на 3,5%, девятый год подряд опережая рост мировой экономики (2,5%). За последние пять лет в этом секторе было создано каждое четвертое из новых рабочих мест, а к 2024 году, по прогнозам ВСТП, вклад туризма в мировой ВВП составит 10,8% от общего объема ВВП (13 трлн. долл. США) и 10,8% всей занятости в мире (371 млн рабочих мест) (Туриндустрия, 2020).

В 2018 году в России вклад туризма в ВВП страны составлял 4,2%. Согласно совместному прогнозу специалистов ВСТП и Oxford Economics, к 2024 году этот вклад мог достичь 5,1%, а занятость в туристской отрасли – подняться до уровня 5,1%, или ~3,6 млн рабочих мест (Туриндустрия, 2020).

Однако в 2020 г. российская индустрия туризма столкнулась с тяжелым кризисом, связанным со стремительным распространением нового вида коронавируса (COVID-19): падение оборота в сфере туризма достигло 95-100%, а объем недополученных доходов из-за ограничений, введенных в рамках борьбы с пандемией COVID-19, к середине 2020 г. превысил 1,5 трлн. рублей (Третьяк, 2021). На 1.01.2022 г. рассматривались два сценария восстановления туристской отрасли России: умеренно оптимистичный и консервативный (Влияние пандемии, 2020). Согласно первому сценарию предполагалось, что турпотоки в России восстановятся к 2022 году, но значительная часть участников российского туристского рынка (26%) считала, что это произойдет не ранее 2023 и 2024 гг.

Связь между изменением климата и туризмом многогранна. Климат – определяющий фактор региональных рекреационных ресурсов, в частности туризма. Изменения климата могут существенно влиять на структуру туристской активности, стимулируя или ограничивая развитие отдельных видов рекреации, особенно в отпускной период. В отечественной литературе по вопросам туристской деятельности климат долгое время относили к «статичным» факторам, полагая, что в отличие от изменчивой погоды, он является достаточно стабильным. Допускалось, что со временем климат изменится, но процесс этот будет чрезвычайно медленным. Между тем туризм очень чувствителен к изменению климата. Прямые угрозы для сектора – потеря биоразнообразия и утрата достопримечательностей в туристских районах, усиливающиеся экстремальные погодные явления; косвенные – увеличение расходов на страхование и безопасность, нехватка и качество воды и т.д. Климат влияет на комфортность условий отдыха, выбор туристских маршрутов, их продолжительность и сезонность. Прогнозируемое повышение температуры воздуха напрямую повлияет на зависящие от климата туристские рынки, прежде всего пляжный и зимний туризм (очень высокая степень достоверности) (Hoegh-Guldberg et al., 2018).

Окружающая среда, личная безопасность и дорожные расходы являются основными факторами при принятии решения о поездках. По прогнозам, все эти факторы будут подвергаться влиянию изменения климата, что для туризма будет иметь далекоидущие последствия как с точки зрения объемов инвестиций в сектор,

так и размеров эксплуатационных и транспортных расходов, структуры спроса на туристские услуги и т.д. (Scott, Gössling, 2018). Одновременно и сам туризм несет ответственность за обеспечение устойчивого развития. Таким образом, необходимо развивать исследования о влиянии современного изменения климата на туризм, особенно на региональном уровне.

Ключевыми темами, которые обсуждаются в контексте последствий изменения климата для туризма, стали:

- трансформация (изменение и перераспределение) туристских маршрутов;
- изменение окружающей среды и конкурентоспособность рекреационных территорий по трем основным направлениям сегмента туристского рынка (пляжный, зимний спортивный и природный);
- разработка политики смягчения последствий и вопросы адаптации туристской отрасли к климатическим вызовам.

### 2.3.10.1 Оценка трансформации туристского спроса

Изменения климата приводят к трансформации пространственно-временного распределения климатических ресурсов для туризма и, следовательно, основных внутренних и международных туристских потоков и расходов (Золотокрылин и др., 2018). Одним из прямых следствий прогнозируемого изменения климата для туризма станет перераспределение климатических активов между туристскими регионами, которое проявится в изменении сезонности туризма, спроса на него и моделей путешествий. Изменения продолжительности и качества туристского сезона в теплую погоду могут серьезно повлиять на конкурентоспособность направлений и прибыльность туристских предприятий (Scott et al., 2004).

Последствия изменения климата на территории России для туристской индустрии будут проявляться по-разному. Как правило, туристская климатическая привлекательность и туристский потенциал курортов или регионов оцениваются по набору осредненных биоклиматических факторов отдельных курортов без учета динамики изменения климатических параметров (Поволоцкая, 2012; Григорьева, Фетисов, 2009). Другим направлением в отечественных исследованиях является оценка текущих изменений климата. В работах, посвященных выявлению тенденций изменения глобального и регионального климата и оценке их влияния на современное состояние и развитие туризма, определены перспективы развития зимнего туризма, отдыха и рекреации на Дальнем Востоке, в Кавказском регионе и на Черноморском побережье России (Пестерева и др., 2018; Pestereva et al., 2015; Pestereva, 2014a). На основании полученных выводов авторы планируют разработать метеорологo- и эколого-экономические модели адаптации организационно-экономической деятельности горнолыжных курортов, комплексов и центров зимнего отдыха к изменениям климата, разработать практические рекомендации по совершенствованию деятельности санаторно-курортной и туристско-рекреационной сферы на территории Дальневосточного региона для повышения качества жизни населения (Пестерева и др., 2018). Несмотря на важность перечисленных исследований, в настоящее время требуются оценки влияния изменений климата на туристско-климатические ресурсы в долгосрочной перспективе.

По целому ряду направлений туристской деятельности, прежде всего зимних видов рекреации, изменение климата (смягчение суровости зим в восточной части страны, ожидаемый здесь

рост количества твердых осадков в зимний период) может привести к развитию туризма в восточных районах страны, где в настоящее время отсутствует соответствующая индустриальная и транспортная инфраструктура (Туриндустрия, 2020). Оценки параметров, определяющих туристский комфорт будущего (хотя и с некоторой степенью неопределенности прогноза), должны учитываться при перспективном планировании развития отрасли. Среди работ этого направления следует отметить исследование по оценке рекреационных ресурсов с использованием универсального индекса теплового комфорта (UTCI), в котором приводится прогноз его изменений на середину XXI века для территорий с особыми (дискомфортными) климатическими условиями (Золотокрылин и др., 2018); цикл исследований по оценке туристской привлекательности южных регионов страны, в котором дается прогноз на конец XXI века для Черноморского, Каспийского и Азовского регионов, а также горных районов Большого Кавказа (Рыбак, Рыбак, 2019); оценки рекреационно-климатических ресурсов Мурманской области для современных условий и середины XXI века (Виноградова, 2015).

Прогноз возможного влияния будущих изменений регионального климата на существующую пространственную структуру центров развития летнего туризма для территории России, выполненный с использованием региональной модели ГГО (Школьник, Ефимов, 2015) для «индекса туризма» TCI (Mieczkowski, 1985), показал, что в целом к середине XXI века изменение климата благоприятно скажется на развитии летних видов рекреации в регионах, которые традиционно рассматривались как климатически-дискомфортные для летнего туризма (рис. 2.3.10.1). Однако ожидание значительного повышения теплового комфорта на побережьях Балтийского моря в XXI веке и увеличение за счет этого потока въездного туризма, по-видимому, не имеет достаточных оснований (Клюева и др., 2020).

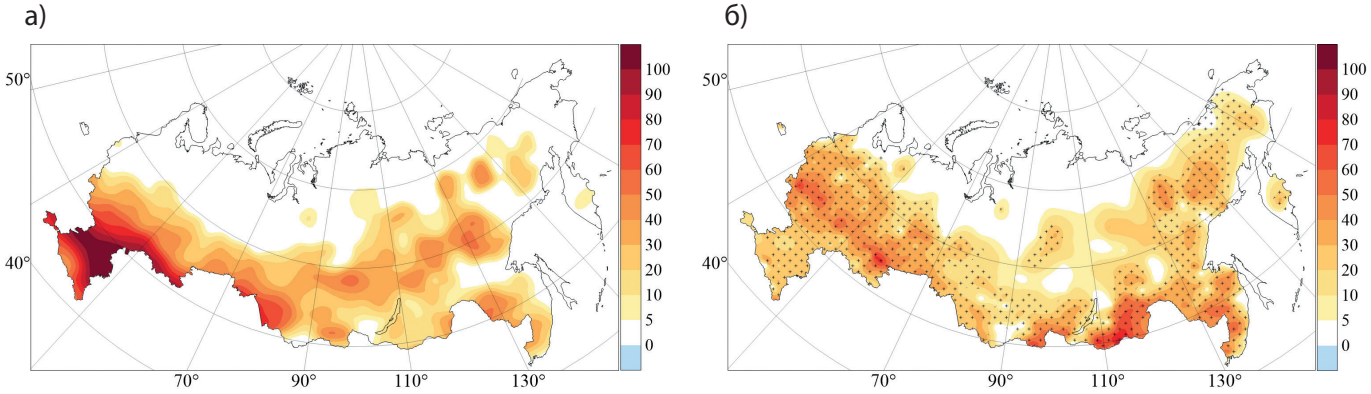



***Рис. 2.3.10.1*** *Продолжительность комфортных для рекреации (категория «городской туризм») периодов (дни). а) средняя продолжительность за период 1981-2010 гг. б) Ожидаемые изменения (в среднем по ансамблю) к середине XXI века (результаты региональной климатической модели ГГО, сценарий RCP8.5)*

*Примечание: точками обозначены регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения к стандартному отклонению изменений в ансамбле превышает единицу*

Тем не менее последствия климатических изменений для географического перераспределения туристского спроса в целом достаточно значительны и потребуют адаптации как для курортов, которые могут потерять туристскую привлекательность, так и для тех, кто,

как ожидается, получит возможности для развития туризма.

Неопределенности в отношении потенциального воздействия изменения климата на экологические ресурсы туризма (например, повышение уровня моря, водоснабжение, биоразнообразие), политические и социальные условия в результате глобальных изменений в настоящее время исключают любое «окончательное» заявление о чистом воздействии изменения климата на туристскую индустрию России даже на середину столетия. Необходимы комплексные оценки спроса на туризм (международные и внутренние прибытия), как это сделано в работах (International tourism trends in EU-28, 2014; UNWTO, 2019; UNWTO, 2011), где представлен прогноз эволюции внутреннего туризма до 2030 года, а также информация о видах транспорта и средних расстояниях в пути. И хотя эти оценки пока не включают прогноз всех составляющих туристской деятельности, зависящих от изменения климата, данные исследования являются пилотными на пути моделирования перераспределения туристских потоков.

### 2.3.10.2 Пляжный туризм

Повышение уровня моря и высокая частота экстремальных погодных явлений (тайфунов, ураганов и т.д.), которые ставят под угрозу прибрежную туристскую инфраструктуру, повышение температуры воздуха выше критической – вот основные проблемы, обсуждаемые в контексте пляжного туризма в мировом сообществе.

В России от аналогичных угроз может пострадать наиболее популярный с точки зрения туристской востребованности регион – побережья Черного и Азовского морей. Анализ возможных рисков от изменения климата для рекреации на территории Северного Кавказа показал, что рост температуры воздуха понизит комфортность пребывания в этом регионе в летние месяцы, а ожидаемое увеличение количества осадков приведет к росту повторяемости опасных гидрологических явлений (Рыбак, Рыбак, 2019).

Прогнозируемое повышение уровня моря может существенно повлиять на пляжный туризм и отдых за счет воздействия на ландшафты и важнейшие транспортные инфраструктуры: гавани и аэропорты. Существуют опасения и по поводу воздействия повышения уровня моря на туристские объекты, т.к. туристская инфраструктура часто является причиной деградации естественной буферной среды (например, сжатие побережья).

Увеличение повторяемости сильных ветров и штормов, подъем уровня моря приводит к абразии пляжей в курортных регионах Калининградской области, Каспийского региона в районе Махачкалы, Дербента (Росгидромет, 2014). Побережья Азовского моря с сильной и средней активностью абразионно-оползневых процессов составляют 48% береговой линии. Здесь весьма вероятно затопление прибрежной инфраструктуры и поселков, увеличение среднего уровня которого на 0,5-1 м с учетом сгонно-нагонных колебаний приведет к дальнейшему сильному размыву берега. В зоне затопления могут оказаться такие города, как Темрюк, Приморско-Ахтарск, Ейск и Таганрог (Росгидромет, 2014), т.е. Приазовье – один из наиболее перспективных для развития рекреации регионов России – находится под серьезной угрозой.

Методы берегозащиты, применяемые в настоящее время (строительство бунов), значительно снижают эстетическую привлекательность курортов. Например, установлено, что туристы на Барбадосе предпочитают не останавливаться на отдых в местах с сильной абразией пляжа. В (Buzinde et al., 2010) отмечается разочарование туристов, обнаруживших несоответствие между ожиданиями и реальностью на пляжных курортах, подверженных абразии.

Для пляжного туризма большое значение имеет качество морской воды. Например, потепление климата в Балтийском регионе должно способствовать развитию морского и пляжного туризма. Однако развитие гипоксийно-аноксийных условий в Финском заливе Балтийского моря приведет к усилению насыщения его акватории биогенными организмами, что снизит привлекательность региона. В водах Калининградского шельфа, в Куршском и Вислинском заливах уровень эвтрофикации весьма значителен уже сейчас (Росгидромет, 2014). Повышение температуры воды будет способствовать развитию теплолюбивых сине-зеленых водорослей, а также увеличению популяций медуз, что негативным образом отразится на развитии морского и пляжного туризма.

### 2.3.10.3 Зимний спортивный туризм

Зависимость лыжного спорта от благоприятных атмосферных и снежных условий делает его особенно уязвимым к изменению климата. Вопросам, связанным с чувствительностью лыжного туризма к погодным и/или снежным условиям, влиянием изменения климата на продолжительность сезона, а также с разработкой новых технологий и адаптационных мероприятий посвящено значительное число работ, рассмотренных в обзорных статьях как в России (Tarasova et al., 2015), так и за рубежом (Steiger et al., 2017).

В целом, туристской отрасли в России следует сделать акцент на развитие зимних видов туризма. Оценки трендов температуры воздуха в Уральском и Сибирском регионах показали сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –25 °С в дневные часы и рост числа дней с температурами в комфортном для зимнего туриста диапазоне от –10 до –5 °С, растет и число дней с высотой снега более 20 см. Все это значительно улучшает комфортность пребывания на открытом воздухе в холодный период года в Сибири. Комплексная оценка изменения природно-климатических горнолыжных ресурсов для территории Дальнего Востока, в которой учитывались мощность и длительность залегания снежного покрова и воздействие окружающей среды на комфортное теплоощущение человека в холодное время года, также показала, что в последнее десятилетие этот регион характеризуется наиболее благоприятными биоклиматическими условиями зимнего туризма, отдыха и рекреации и имеет хорошие перспективы для их дальнейшего развития (Пестерева и др., 2018).

В последнее годы в нашей стране наиболее популярным видом зимнего отдыха стал горнолыжный туризм, развитие которого поддерживается на государственном уровне, но в мировом объеме индустрии горнолыжного спорта доля России в настоящее время составляет только 2%, хотя ее потенциал оценивается как достаточно высокий с возможным уровнем потребления до 10 млн чел. (Безрукова, 2019). В стране существует около 50 горнолыжных туристских курортов (основными из них являются Домбай, Хибины, Теберда, Азбеково, Красная Поляна), обладающих необходимыми природ-

ными ресурсами и инфраструктурой, а также более 300 туристских центров, предоставляющих возможность горнолыжного спуска.

Наиболее уязвимыми к изменению климата являются туристские центры Кавказско-Черноморского рекреационного района, западной и центральной частей ЕТР. Модельные оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в районе Красной Поляны показали, что современные тенденции достаточно благоприятны для развития горнолыжной индустрии в Сочи: с ноября по март наблюдаются слабо выраженное понижение средних месячных температур и незначительное увеличение количества осадков, особенно заметное в марте (Pestereva et al., 2015). Однако из 55 сезонов (с 1960 по 2014 г.) в 10 сезонах устойчивый снежный покров не сформировался, и лишь в семи сезонах продолжительность залегания устойчивого снежного покрова превышала 100 дней. Уменьшение продолжительности произошло скачкообразно в 1980 г. и продолжается до настоящего времени (Сократов и др., 2014). По оценкам, выполненным с использованием региональной климатической модели ГГО (Школьник, Ефимов, 2015), к середине текущего века расчетное количество твердых осадков в горах южного макросклона Большого Кавказа к середине столетия может уменьшиться на 25-30%, что приведет к снижению максимальной декадной толщины снежного покрова на 29-35% и сокращению числа дней со снежным покровом на 35-40%. Несмотря на то что в настоящее время уже накоплен опыт реагирования индустрии зимнего отдыха на изменение климата путем формирования покрова из искусственно произведенного снега, в районе Западного Кавказа столь высокие температуры воздуха, что применение установок по производству искусственного снега потребует совершенствования существующих технологий, возможно, с использованием химических добавок, что существенно снизит туристскую привлекательность курорта (Сократов и др., 2014).

Горнолыжные курорты западной и центральной частей ЕТР, расположенные на высотах до 200 м, уже сейчас испытывают влияние изменения климата. Основной негативный вклад также вносит состояние снежного покрова. Здесь на нем отрицательно сказываются уменьшение числа дней с высотой снега 20 см и более и увеличение частоты и интенсивности жидких осадков в зимнее время. При этом для центральных районов, начиная с 2000 года, это становится особенно критичным. Искусственное формирование покрова из искусственно произведенного снега уже не всегда технически возможно из-за роста зимних температур, а в дальнейшем велика вероятность того, что курорты не смогут открыться на срок, окупающий их функционирование.

В настоящее время многие вопросы теории и практики оценки воздействия современных климатических тенденций на развитие российских горнолыжных курортов и центров зимних видов спорта разработаны недостаточно. Особенно это относится к оценке рисков, в том числе социально-экономических, от неблагоприятных погодно-климатических условий и к разработке современных механизмов адаптации (Pestereva, 2014a). Сегодня разработан ряд инженерных технологий для снижения риска воздействия неблагоприятных климатических условий и повышения устойчивости горнолыжного курорта. Однако расходы на оборудование и адаптационные меры могут в разы увеличить цену пребывания туристов на горнолыжном курорте или поставить компании на грань банкротства (Pestereva, 2014б).

### 2.3.10.4 Природный туризм

Природный туризм – это знакомство туристов с дикой природой. К нему относят виды туризма, которые напрямую связаны с использованием ресурсов окружающей дикой природы, природных ландшафтов, водных ресурсов, рельефа, диких флоры и фауны. В России наиболее уязвимыми в этом подразделе туристской деятельности являются горный, арктический и экологический виды туризма.

**Горный туризм**

Результаты многочисленных исследований показывают, что изменение основных климатических факторов, а именно температуры воздуха и осадков, определяет общую тенденцию изменения ледников в горных регионах России. Анализ изменений площади и объема ледниковой системы горы Эльбрус на Центральном Кавказе с 1997 по 2017 г. показал, что покрытая ледником территория горы уменьшилась с 125 в 1997 г. до 112 км$^2$ в 2017 г., сокращение составило 10,8%. Скорость потери массы ледника Эльбруса в 1997-2017 гг. увеличилась втрое по сравнению с периодом 1957-1997 гг. (Kutuzov et al., 2019). На Дальнем Востоке сокращение ледников во второй половине XX века колеблется от 10,6% (Камчатка) до 69% (Корякское нагорье). Ледники Горного Алтая уменьшились на 20% (Kutuzov et al., 2019). Площади ледников Полярного Урала сократились в среднем на 23% в период с 1960-х годов по 2008 год (Росгидромет, 2014). При этом скорость сокращения такова, что если ситуация не изменится, то к середине XXI века они могут полностью исчезнуть.

Деградация ледников, помимо снижения туристской привлекательности горных территорий и, как следствие, сокращения турпотока, приводит к весьма значительной угрозе селей, лавин и оползней (Разумов и др. 2020). Многие рекреационные объекты в высокогорной части Северного Кавказа все чаще подвергаются этим опасным природным процессам.

**Арктический туризм**

Российская арктическая зона – уникальное природное пространство, на котором располагается девять государственных природных заповедников и два национальных парка. По мнению руководителей Федерального агентства по туризму, арктический туризм на российском севере в перспективе может обеспечить доход не меньше, чем добыча полезных ископаемых (Васильева, Муратова, 2016). По статистике Ростуризма, в начале 2000-х гг. в круизах и других видах туристских программ в Арктике около 90% участников составляли иностранные туристы, но в настоящее время число российских граждан в таких поездках значительно возросло и в групповых турах, и в среднем составляет 25-30%.

Наиболее благоприятные условия для туризма складываются в западном секторе Российского сегмента Арктики, где погода становится более комфортной и продолжительность туристского сезона увеличивается (Лебедева и др., 2021), а уменьшение площади морского льда (рис. 2.3.10.2) способствует развитию здесь морского и круизного туризма.

В последние годы предлагается все больше круизов, протяженность сезонных путешествий увеличивается, строятся специализированные полярные круизные суда с большим числом пассажирских мест (Лукин, 2016). Однако, к сожалению, благоприятные и более комфортные условия для развития туризма могут быть абсолютно неприемлемыми или опасными для хрупких экосистем Арктического бассейна (Лебедева и др., 2021).

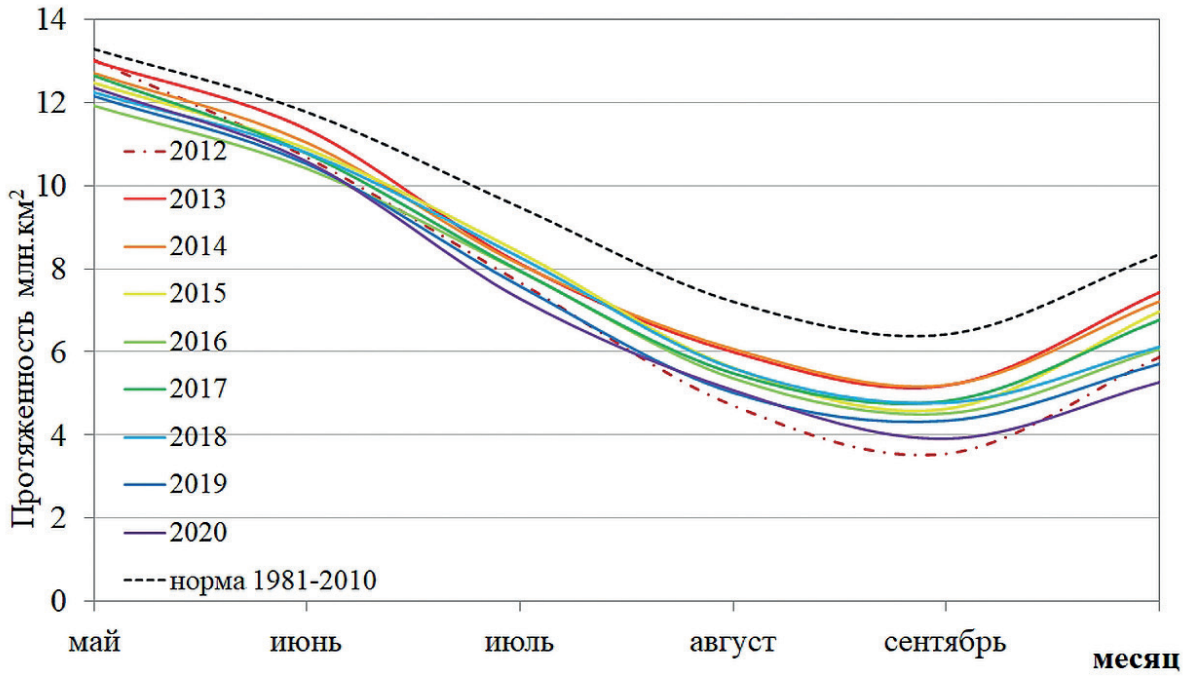



***Рис. 2.3.10.2*** *Динамика протяженности морского льда в Северном полушарии в теплое время года за период с 2012 по 2020 г. (Лебедева и др., 2021)*

По оценкам МГЭИК (Meredith et al., 2019), рост полярного круизного туризма создает риски, связанные разрушением местных сообществ и экологической устойчивости, снижением биоразнообразия свободной ото льда территории (арктической маргинальной ледяной зоны), особенно уязвимой от прямого воздействия человека (Pestereva, 2014a). Выработанные правила туризма для арктического региона (низкая туристская нагрузка, соблюдение дистанционных правил) часто нарушаются (Dawson et al., 2011; Johnston et al., 2017). В настоящее время одной из движущих сил арктического туризма стали ожидаемые негативные последствия изменения климата. Возник туристский рынок, известный как «туризм последнего шанса», на котором туристы стремятся успеть увидеть морские пейзажи, а также природное и социальное наследие Арктики прежде, чем они исчезнут (Lemelin et al., 2010).

Арктический туризм обладает рядом специфических характеристик, сдерживающих его развитие для отечественного туриста. Помимо очевидных особых природно-климатических условий (суровый климат, ярко выраженная сезонность, сильная зависимость от текущих погодных условий), необходимо отметить удаленность и труднодоступность привлекательных для туристов районов, высокие транспортные расходы. Эти факторы сказываются на стоимости арктических путешествий, и цены на морские арктические круизы являются недоступными для массового отечественного потребителя (Лебедева и др., 2021).

**Экологический туризм**

На сегодняшний день экологический туризм – наиболее быстроразвивающийся сектор индустрии туризма – занимает одну из ведущих позиций. По некоторым оценкам (Лапочкина и др.,

2016), на долю экотуризма в мире приходится уже более 10% прибыли от всего туристского рынка. Благодаря природным запасам Россия рассматривается мировым сообществом как наиболее перспективная страна для развития экотуризма.

В России экологический туризм начал развиваться позднее, чем в Европе или США. Отсутствие дорог и средств связи в отдаленных районах тормозят его распространение. В то же время в России существуют все предпосылки для развития экотуризма: обширная малозаселенная территория, разнообразие природных зон и ландшафтов, 29 объектов, находящихся в списке Всемирного наследия ЮНЕСКО, ежегодно привлекают все больше местных и иностранных экотуристов, стремящихся посетить уникальные природные регионы (Всемирное природное наследие, 2020). По состоянию на 01.01.2019 г. в нашей стране насчитывается 12 тысяч особо охраняемых природных территорий общей площадью 232,5 млн га с учетом водных акваторий. В 2020 году национальные парки посетили более 8,5 млн туристов, а к 2024 году планируется увеличить поток до 10 млн в год.

Оценки продолжительности комфортного периода для данного направления в настоящее время, среднесрочной и долгосрочной перспективах на севере Европейской территории России, в Сибири и на Дальнем Востоке показали, что тенденция изменения термического комфорта для экотуризма в целом благоприятна: в середине столетия продолжительность комфортного сезона увеличится в среднем на месяц на Европейском севере, а к концу столетия в Мурманской области, в Республике Карелия и на юге Приморского края на 2-3 месяца (Клюева и др., 2020).

Все виды природного туризма зависят не только от уровня климатического комфорта. Изменение климата – это расширение ареалов некоторых болезней, переносимых насекомыми (малярия, клещевой энцефалит). Исследования влияния изменения климата на эпидемиологические процессы выявили увеличение площадей природно-очаговых инфекций, опасных для туристов. Повышение среднемесячной температуры воздуха, воды водоемов вызывает рост числа случаев инфекционных заболеваний за счет активизации размножения возбудителей (сальмонеллезы, шигеллезы, другие кишечные инфекции) (Росгидромет, 2014).

Туристская привлекательность природных объектов снижается от участившихся лесных пожаров. Современные модельные расчеты (Росгидромет, 2014) показывают удвоение площади пожаров, рост частоты пожаров на 50%, возрастание деструктивных послепожарных воздействий на лесные экосистемы и ландшафты для большей части территории России к концу XXI века (Лазарева и др., 2019; Третьяк, 2021). Еще одна угроза для ландшафтов – увеличение числа вредителей, являющихся одной из причин гибели лесов. В годы с повышенной теплообеспеченностью формируются очаги их массового размножения (Маслов, 2010). Даже в северных районах, где ранее не было ни одной крупной вспышки численности короеда, жара 2010 г. и последовавшие вслед за ней лесные ветровалы привели к тому, что уже в 2013 г. популяция насекомых-вредителей достигла эпидемиологических размеров.

### 2.3.10.5 Адаптация туристской отрасли к изменению климата

Цель адаптации туристского сектора к климатическим изменениям состоит в том, чтобы сни-

зить риски потери основного дохода туристскими компаниями, сохранить природные ресурсы и экосистемы (Акулова, 2019).

В настоящее время в России влияние изменения климата на туристский бизнес незначительно, но в дальнейшем необратимые изменения в ландшафтах, в биоразнообразии, утрата достопримечательностей приведут к серьезным последствиям для отрасли. Эти последствия окажут влияние на всю систему туризма: трансформацию туристских потоков, транзитные регионы и транспортные системы. Туристские регионы и сами путешественники должны будут адаптироваться к этим изменениям.

Адаптационные мероприятия в сфере туризма должны быть направлены как на использование позитивных возможностей, открывающихся в результате климатических изменений, так и на предотвращение негативных последствий. Для российской туристской отрасли позитивные последствия связаны, например, с расширением доступа к природным ресурсам северных территорий и с новыми возможностями для арктического туризма, отдыха и рыболовства, для организации особо актуального в последние годы экотуризма, ознакомления с народными промыслами и культурным наследием северных народов. Но адаптационные мероприятия в этом регионе должны обязательно включать и создание специальной нормативной базы, обеспечивающей на уровне законов правила поведения туристов в этих регионах, развитие систем мониторинга состояния окружающей среды, создание туристской инфраструктуры.

Создание конкурентоспособной туристской инфраструктуры в АТР позволит развивать здесь туристские направления зимнего периода. В центральных и южных районах АТР ожидаемые последствия изменения климата связаны с увеличением повторяемости числа комфортных для зимнего туризма дней, смягчением к середине столетия суровости термического режима и роста количества осадков в зимний период и, следовательно, увеличением высоты снежного покрова. Это позволит осуществлять эксплуатацию курортов без дополнительных дорогих адаптационных мероприятий (искусственное оснежение, диверсификация видов деятельности).

Вместе с тем уязвимость сектора туризма в России к влиянию изменения климата высока. Основные угрозы для некоторых туристских направлений описаны в предыдущих разделах, и адаптация должна быть направлена на смягчение указанных негативных последствий для отрасли. Это мероприятия, связанные с охраной окружающей среды, техническим усовершенствованием туристской инфраструктуры, мониторингом неблагоприятных и опасных явлений погоды, созданием аварийно-спасательных служб в туристских регионах для повышения оперативности проведения аварийно-спасательных операций. Особого внимания заслуживают адаптационные мероприятия по сохранению природных экосистем и биологического разнообразия. Взаимодействие с местными сообществами потребует привлечения как экономических, так и социальных мер.

Для поддержания сектора туризма в условиях глобального потепления потребуются дополнительные вложения от государства, иначе туристская отрасль рискует потерять значительную часть своих клиентов (Акулова, 2019).

## Список литературы


**Акулова Е. О., 2019:** Климатические изменения как фактор отрицательного воздействия на индустрию туризма // Modern Economy Success. – № 6. – С. 45-50.

**Безрукова Н. Л., 2019:** Ресурсный потенциал России в структуре мирового горнолыжного туризма // Вестник РМАТ. – № 3. – С. 115-119.

**Васильева И. О., Муратова М. Н., 2016:** Развитие туризма в Арктике // Международный научно-исследовательский журнал. – № 11-2(53). – С. 78-83. DOI 10.18454/IRJ.2016.53.230.

**Виноградова В. В., 2015:** Природно-климатические и биоклиматические условия жизни населения Мурманской области // Известия РАН. Серия географическая. – № 6. – С. 90-99.

**Влияние пандемии COVID-19 на сферу туризма в РФ: текущая ситуация и перспективы восстановления, 2020.** – КПМГ в России и СНГ / Электронный ресурс: kpmg.ru.

**Всемирная туристская организация, 2018:** «Всемирная конференция Туризм и энергия будущего – Сокращение выбросов $CO_2$, ЭКСПО-2017, Астана, Казахстан, 26-27 июня 2017 г.», версия на русском языке, ЮНВТО, Мадрид, DOI: https://doi.org/10.18111/9789284419517

**Всемирное природное наследие:** 25 лет в России, 2020 / М. Крейндлин, А. Петров [и др.]. – М.: ОМНИО «Совет Гринпис», 2020. – 226 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В., Глезер О. Б., 2018:** Биоклимат и рекреационные ресурсы территорий с особыми климатическими условиями / В кн.: Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России. – М. – С. 90-111.

**Григорьева Е. А., Фетисов Д. М., 2009:** Оценка пригодности климата района для спортивно-оздоровительной рекреации // Медицинская экология. – № 6. – С. 211-216.

**Клюева М. В., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., Павлова Т. В., Катцов В. М., 2020:** Летний туризм в контексте будущих изменений климата России: оценки по большому ансамблю условных прогнозов высокого разрешения // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 47-59.

**Лазарева А. А. Слаута А. А., Афонина Т. Е., 2019:** Мониторинг геосистем особо охраняемых природных территорий в условиях антропогенной нагрузки // Наука. Инновации. Технологии. – № 1. – С. 35-46.

**Лапочкина В. В., Косарева Н. В., Адашова Т. А., 2016:** Экологический туризм в России: тенденции развития // Международный научно-исследовательский журнал. – № 5 (47), Часть 1. – С. 100-105.

**Лебедева С. А., Пестерева Н. М., Белякова М. Ю., 2021:** Состояние, развитие и продвижение экологического туризма в Российской Федерации. Туризм: региональные тенденции развития / Под. общ. ред. проф. В. В. Лихановой. – Чита: Забайкальский ГУ. – С. 63-80.

**Лукин Ю. Ф., 2016:** Арктический туризм в России // Арктика и Север. – № 25. – С. 211-216. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.25.211.

**Маслов А. Д., 2010:** Короед-типограф и усыхание еловых лесов. – Пушкино: ВНИИЛМ. – 138 с.

**Пестерева Н. М., Хечумян А. Ф., Ворожбит Н. А., 2018:** Комплексная биоклиматическая оценка комфортности территорий Дальнего Востока России для зимней рекреации и лечебно-оздоровительного туризма // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – № 2. – С. 35-42. https://doi.org/10.17116/kurort201895237-42.

**Поволоцкая Н. П., 2012:** Биоклиматический потенциал Федерального курорта Кисловодск // Курортная медицина. – № 2. – С. 13-18.

**Разумов В. В., Висхаджиева К. С., Богданова Н. Д., Лысенко А. В., 2020:** Опасность и активность оползневой деятельности на территории кавказских минеральных вод // Наука. Инновации. Технологии. – № 1. – С. 47-72. DOI 10.37493/2308-4758.2020.1.4.

**Рыбак О. О. Рыбак Е. А. и др., 2019:** Туризм и климат: примеры использования метеорологической информации для оценки туристской привлекательности регионов. Российские регионы рекреационно-туристской специализации: состояние, проблемы, перспективы развития / Под. ред. О. О. Рыбака, А. В. Волкова. – Сочи: «Оптима». – 420 с. ISBN 978-5-00049-002-0.

**Сократов С. А., Селиверстов Ю. Г., Шныпарков А. Л., 2014:** Оценка экономического риска для горнолыжных курортов, связанного с изменением продолжительности залегания снежного покрова // Лед и Снег. – 2014, № 3 (127). – С. 100-106.

**Третьяк Т. М., 2021:** Спрос на туристические услуги в России во время пандемии COVID-19. Статистика в современном мире: методы, модели, инструменты / Материалы VII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 22 апреля 2021 года. – Ростов-на-Дону, ООО «АзовПринт». – С. 60-64.

**Туризм и климатические изменения (2007).** Семнадцатая сессия Генеральной ассамблеи UNWTO. Картахена де Индиас (Колумбия), 23-29 ноября 2007 года / https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/unwtogad.2007.4.w9j6161k63mv8414.

**Туриндустрия через призму драйверов и барьеров бизнеса. Центр социально-экономических исследований, 2020 г.** – Фонд «Стратегических разработок». https://www.csr.ru/ru/publications/turindustriya-cherez-prizmu-drayverov-i-barerov-biznesa/.

**Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015:** Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – Вып. 576. – С. 201-211.

**Buzinde C., Manuel-Navarrete D., Kerstetter D., Redclift M., 2010:** Representations and adaptation to climate change // Annals of Tourism Research, v. 37, pp. 581-603. 10.1016/j.annals.2009.10.018.

**Dawson J., Johnston M. J., Stewart E. J., Lemieux C. J., Lemelin R. H., Maher P. T., Grimwood B. S. R., 2011:** Ethical considerations of last chance tourism // Journal of Ecotourism, v. 10, № . 3, pp. 250-265. DOI: 10.1080/14724049.2011.617449.

**Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Bindi M., Brown S., Camilloni I., Diedhiou A., Djalante R., Ebi K. L., Engelbrecht F., Guiot J., Hijioka Y., Mehrotra S., Payne A., Seneviratne S. I., Thomas A., Warren R., Zhou G., 2018:** Impacts of 1.5ºC Global Warming on Natural and Human Systems / In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

**International tourism trends in EU-28 – current situation and forecasts for 2020-2025-2030, 2014** // https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/vto/content/international-tourism-trends-eu-28-current-situation-and-forecasts-2020-2025-2030.

**Johnston M., Dawson J., De Souza E., Stewart E. J., 2017:** Management challenges for the fastest growing marine shipping sector in Arctic Canada: pleasure crafts // Polar Record, v. 53, № 1, pp. 67-78, doi:10.1017/s0032247416000565.

**Kutuzov S., Erofeev A., Lavrentiev I., Smirnov A., Kopysov S., Abbasov Z., Nikitin K., 2019:** Observations were re-established on Aktru glaciers in Altai // Ice and Snow, v. 59, № 3, p. 306. 10.15356/2076-6734-2019-3-469.

**Lemelin R. H., Dawson J., Stewart E. J., Maher P., Lueck M., 2010:** Last-chance tourism: the boom, doom, and gloom of visiting vanishing destinations // Current Issues in Tourism, v. 13, № 5, pp. 477-493. DOI: 10.1080/13683500903406367.

**Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M. M. C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E. A. G., 2019:** Polar Regions / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)].?? p.

**Mieczkowski Z., 1985:** The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism // The Canadian Geographer, v. 29, pp. 220-233.

**Pestereva N., 2014a:** Climate variability coastal areas of the Black Sea for the purposes of tourism on meteorological data for the period of instrumental observationsю / Proceedings of the 1st International Sciences Congress – Fundamental and Applied Studies in America, EU and CIS countries‖. International Agency for the Development of Culture, Education and Science. Canada, Toronto, pp. 211-217.

**Pestereva N. Vorozhbit N., Danilova M. Yanina J., 2015:** Current Trends in Climate Change at the Krasnaya Polyana Ski Resort // European Geographical Studies, v. 5, pp. 10-17. 10.13187/egs.2015.5.10.

**Pestereva N. M., 2014б:** Modern engineering technology to adapt to the adverse weather and climatic conditions at mountain ski resorts // Life Science Journal, v. 11, № 9, pp. 800-804.

**Scott D., Gössling S., 2018:** Tourism and Climate Change Mitigation. Embracing the Paris Agreement / Pathways to Decarbonisation. European Travel Commission (ETC) – Brussels, Belgium, 39 pp.

**Scott D., McBoyle G., Schwarzentruber M., 2004:** Climate change and the distribution of climatic resources for

tourism in North America // Climate Research, v. 27, pp. 105-117. 10.3354/cr027105.

**Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C., 2017:** A critical review of climate change risk for ski tourism // Current Issues in Tourism, v. 22, No. 5, pp. 1-37. DOI: 10.1080/13683500.2017.1410110.

**Tarasova E. V., Grivanova S. M., Grivanov I. Y., Tsvetlyuk L. S., 2015:** A Survey of Research Concerned with the Study of Modern Climate Change and Assessment of Its Impact on Tourism // Recreation, and Sports. European Geographical Studies, v. 5, № 1, pp. 42-63. DOI 10.13187/egs.2015.5.42.

**UNWTO, 2019:** Transport-related CO2 Emissions of the Tourism Sector – Modelling Results / Published UNWTO: December 2019. Pages: 68 ISBN: 978-92-844-1666-0 | ISBN: 978-92-844-1665-3.

**UNWTO, 2011:** United Nations World Tourism Organization (UNWTO). Tourism Towards 2030 – Global Overview / Madrid: UNWTO.

# 3.

# РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ АДАПТАЦИИ К НИМ

# 3.1 Федеральные округа

*И. М. Школьник,*
*Е. М. Акентьева, С. А. Журавлев,*
*М. В. Клюева, О. Н. Липка,*
*В. Н. Павлова, В. В. Стадник,*
*Е. И. Хлебникова, М. Ю. Бардин,*
*В. Ю. Георгиевский,*
*В. А. Задворных, Е. Н. Разова,*
*Ю. Л. Рудакова, Е. П. Самойлова,*
*Д. В. Фасолько*

## Введение

Проблеме изменения климата сопутствует целый комплекс междисциплинарных проблем, охватывающих экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития как Российской Федерации в целом, так и каждого ее региона. Происходящие изменения климата, которые проявляются не только в увеличении повторяемости и интенсивности опасных метеорологических явлений, но и в медленных изменениях климатических характеристик, по-разному воздействуют на сферы жизнедеятельности и экономику в регионах России в силу ее большой территории, многообразия природных зон и откликов на глобальные изменения. В этой связи в последнее десятилетие в России, как и во всем мире, уделяется все больше внимания методам разработки адаптационных мер к изменению и изменчивости климата и разработке как национальных, так и региональных адаптационных программ и планов.

Цель адаптации – уменьшение ущерба от климатических воздействий и использование благоприятных возможностей, которые могут возникать при изменении климата. Наиболее значимые адаптационные мероприятия направлены на снижение неблагоприятных последствий изменения климата. Фундаментом адаптации служит система базовой и специализированной климатической информации для различных секторов экономики, социальной сферы и природных систем. Такая информация обеспечивается национальными системами наблюдения за климатом и современными климатическими моделями, позволяющими прогнозировать возможные в будущем изменения глобального и регионального климата для разных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему.

Для разработки планов адаптации к изменению климата как на общероссийском, так и на региональном уровне должна использоваться информация о комплексах погодно-климатических рисков. Чтобы количественно оценить величину риска, необходимо иметь информацию о метеорологических и климатических характеристиках и их изменениях на рассматриваемой территории, а также данные о подверженности находящихся на ней объектов неблагоприятному воздействию окружающей среды и их уязвимости к этому воздействию. Так, для отраслей технической сферы, стержнем адаптационной стратегии, является актуализация соответствующих нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации инфраструктурных объектов (СП, ГОСТ и др.), которые включали бы информацию о наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменениях.

При переходе на региональный уровень формирование и реализация адаптационных мер, разработанных на отраслевом уровне, требуют значительной корректировки с учетом, как отмечено выше, местных климатических, гидрологических, физико-географических и социально-экономических условий, а также степени уязвимости объектов погодно-климатических воздействий.

Настоящий раздел представляет собой краткий анализ наблюдаемых и ожидаемых воздействий изменений климата на природные системы и ряд отраслей экономики в федеральных округах Российской Федерации. Обозначенные в настоящем разделе направления адаптации в разрезе федеральных округов не претендуют на полноту и оставляют простор для дальнейших междисциплинарных регионально ориентированных исследований, востребованность которых в разрезе субъектов Российской Федерации является очевидным выводом настоящего раздела.

## 3.1.1 Центральный федеральный округ (ЦФО)

### 3.1.1.1 Изменения климата на территории ЦФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ЦФО (рис. 3.1.1.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Смоленске и Воронеже возросла примерно на 2,5 °С, в Рыбинске на 2 °С. В наибольшей степени рост температуры был выражен в холодный период года. Увеличение годового количества осадков на севере ЦФО (рис. 3.1.1.1б) обеспечивалось в основном за счет сумм осадков в холодный период года.

В последнее тридцатилетие на территории ЦФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, высокой степенью пожароопасности, экстремальными температурами (рис. 3.1.1.2).

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.1.3) на всей территории ЦФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 1,5-3 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом могут уменьшиться на 5-15%, в наибольшей степени уменьшение осадков затронет центр и юг ЦФО. Зимой возможен рост температуры воздуха на 3,5-4,5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10-20%.

а) б)

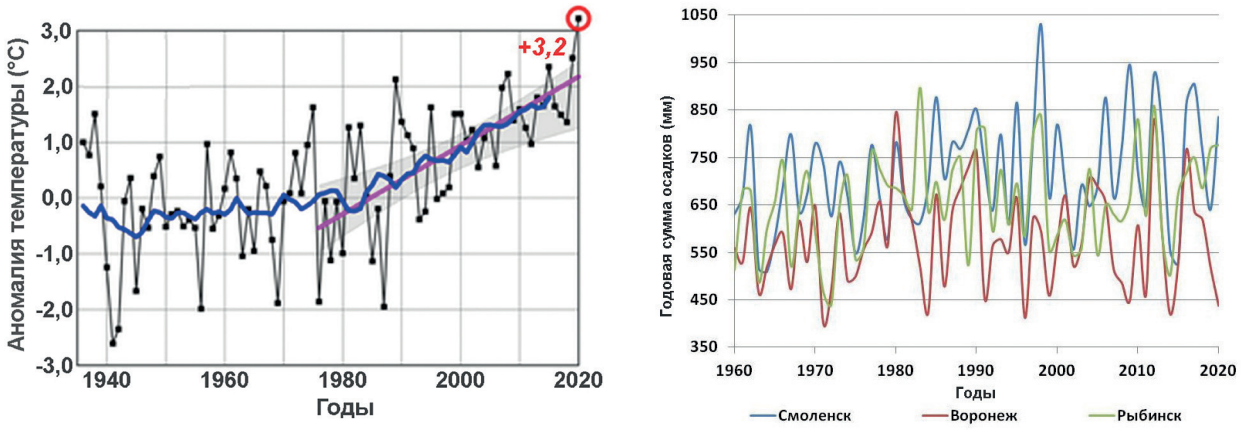



***Рис. 3.1.1.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории ЦФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом). б) Годовые суммы осадков, мм., г. Смоленск, г. Воронеж, г. Рыбинск, 1960-2020 гг.*

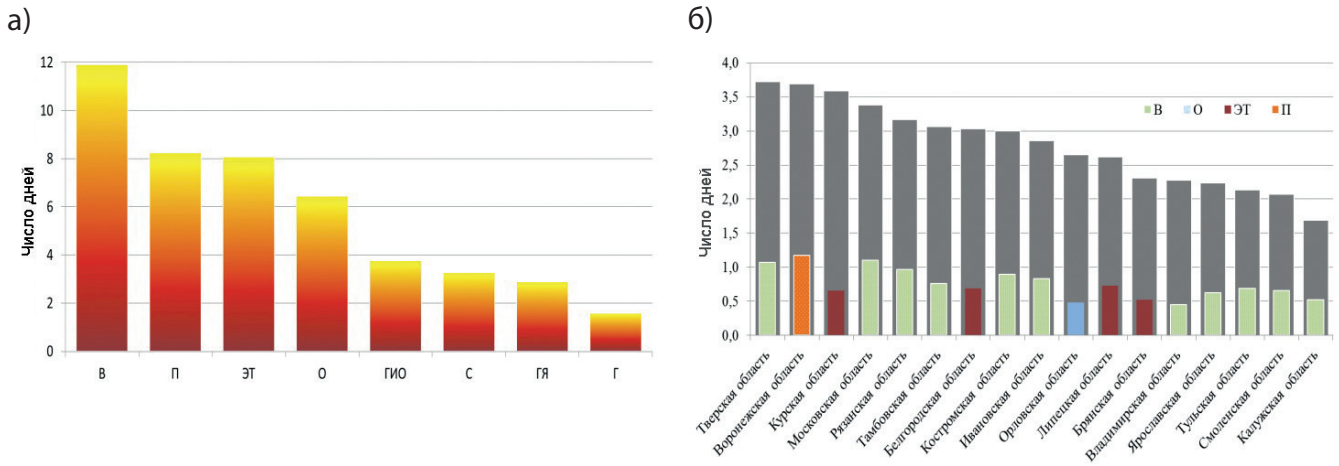



***Рис. 3.1.1.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории ЦФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов ЦФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data). В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

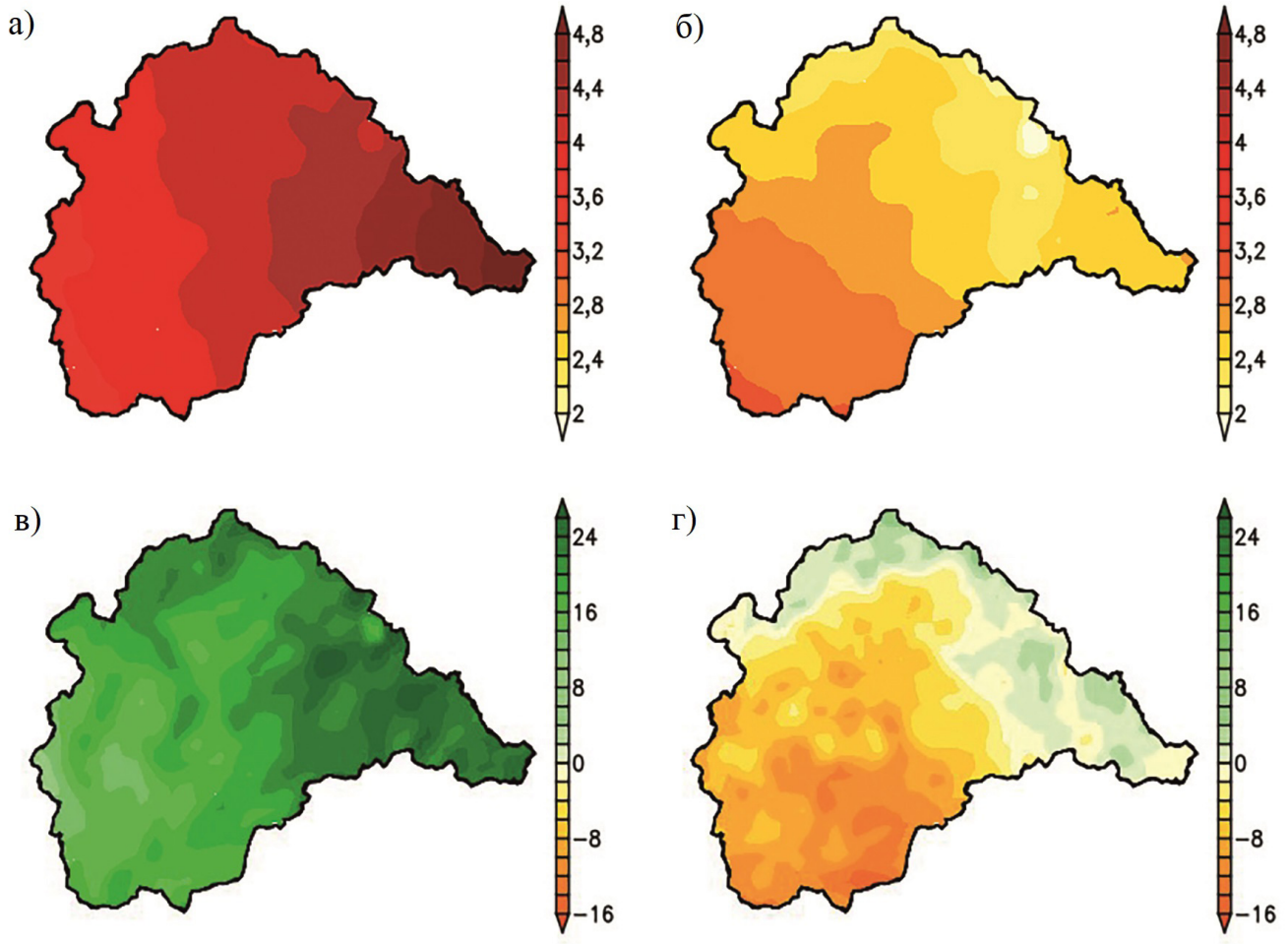



***Рис. 3.1.1.3*** *Изменение средней температуры воздуха, °С, (а, б) и сумм атмосферных осадков (мм/сут.) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории ЦФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.1.2 Природные системы и экономика ЦФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** ЦФО в природном отношении довольно однороден по сравнению с другими федеральными округами в силу относительно небольшой площади. Он расположен преимущественно в пределах двух равнинных биомов, занимая примерно одинаковые площади в зонах смешанных лесов и широколиственных лесов и лесостепи. Малая часть на севере региона находится в зоне бореальных лесов, где южнотаежные еловые и сосновые леса занимают до 60-70% площади, а южная оконечность – в степной. Территория выделяется высоким биологическим разнообразием животных на Восточно-Европейской равнине.
В ЦФО прогнозируется существенное изменение границ природных зон: сдвиг на север хвойно-широколиственных лесов с сокращением их площади. Широколиственные леса будут занимать большую часть территории, уступив место на юге лесостепям и степям (Жильцова, Анисимов, 2015).

С учетом высокой степени трансформированности экосистем, климатообусловленную динамику видов (включая основные лесообразующие породы, такие как ель, сосна и дуб) трудно отделить от других антропогенных факторов (Кузнецова, Сауткина, 2019). Отмечается расширение ареала отдельных видов. Например, ареал черноголовой гаички значительно продвинулся на северо-восток, что связано с более теплой погодой осенью, зимой и весной в последние десятилетия (Конторщиков, 2018).

Сведения об изменении фенологических дат приводятся для разных систематических групп и за разные периоды времени, что затрудняет их сопоставление. Наиболее изученными группами являются высшие сосудистые растения и птицы. Большинством авторов выделяются виды растений, вегетация которых начинается в последние десятилетия раньше на девять дней, у других – несколько позже, отмечаются также «инертные виды» и те, которые, наоборот, завершают вегетацию позже на 14 дней (Зорина и др., 2018; Сапельникова, 2018; Буйволов и др., 2018; Буйволов, Фомин, 2020). Для других видов, например – березы бородавчатой, черемухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной, происходящие климатические изменения пока не оказывают критического влияния на сезонное развитие (Минин и др., 2018).

Связь многолетней динамики сроков весеннего прилета птиц с весенней температурой воздуха подтверждается не всегда. Во всех статистически значимых случаях тренды отрицательные, т.е. произошло смещение дат прилета на более ранние сроки (Сапельникова, 2018). Они наиболее выражены у ближних мигрантов (грача, скворца, жаворонка, белой трясогузки и др.). Сходные тенденции характерны и для водоплавающих птиц, однако сроки их прилета зависят не только от температуры, но и от сроков начала и продолжительности паводка. Сроки появления в Подмосковье дальних мигрантов, зимующих южнее Сахары, менее подвержены колебаниям в зависимости от хода летних температур, но достоверное смещение сроков прилета произошло и у них (кукушка, жулан, луговой чекан и др.) (Волков и др., 2018).

Предполагается вклад изменений климата в сокращение численности некоторых редких видов, в том числе, наяды тончайшей (Vargot et al., 2016). Отмечается негативное воздействие погодных аномалий на популяции диких опылителей (Ясюкевич и др., 2013).

Уязвимость экосистем к изменению климата связана в первую очередь с лесными и торфяными пожарами, засухами и летними ветровыми событиями, в меньшей степени – с биогенными факторами, включая облесение открытых и верховых болот. Ожидается дальнейшее усиление ветрового воздействия, умеренный рост воздействия пожаров, биогенных факторов (см. главы 2.1.1, 2.1.2).

***Баланс почвенного углерода.*** В северной и северо-западной частях ЦФО распространены южнотаежные и смешанные леса, запасы углерода в почвах которых в верхнем тридцатисантиметровом слое составляют 87-90 т С/га (Национальный доклад, 2018). В южной и юго-восточной частях преобладают лесостепи и степи, почвы которых содержат 105 т С/га. Общие запасы углерода в том же слое на землях, покрытых лесом, по состоянию на 2015 г., составляют 1,60±0,29 Гт С, а скорость прироста запасов углерода – одна из самых низких среди всех округов Российской Федерации 0,67±0,33 млн т С/год (Замолодчиков и др., 2018).

В зависимости от типа землепользования и биоклиматической зоны среднее гетеротрофное дыхание почв в пределах округа варьирует от 211 до 357 г С/м$^2$/год (Mukhortova et al., 2021). Высокая вариабельность общего почвенного дыхания отмечается в зависимости от растительной микрогруппировки (Копцик и др., 2018), а также в постагрогенных почвах или почвах контрастного землепользования в лесостепной зоне (Карелин и др., 2015; Сушко и др., 2019). На основе данных 20-летнего мониторинга дыхания дерново-подзолистых почв под лесной и луговой растительностью в южнотаежной зоне показана высокая межгодовая вариабельность дыхания почв: 36-58% для месячных потоков $CO_2$ из почв, 36-44% – для сезонных и 20-22% – для годовых (Курганова и др., 2020).

Баланс углерода в почвах наиболее подвержен изменениям в результате смены землепользования в самом верхнем слое (Kurganova et al., 2014). При зарастании естественной растительностью слабоокультуренных пахотных почв отмечалось накопление углерода в различных типах почв (Kurganova et al., 2019; Телеснина и др., 2017; Овсепян и др., 2020). Например, в результате стихийного забрасывания пахотных угодий запасы углерода в течение первых 20 лет увеличивались в среднем на 5,2-6,3 млн т ежегодно (слой 0,0-0,2 м) (Kurganova et al., 2014). В то же время в серых лесных почвах Орловской области в результате естественного лесозарастания сильноокультуренной пашни запасы углерода в слое 0,0-0,50 м уменьшились в 1,7-2,2 раза (Карелин и др., 2017а).

Как указывается во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014) и других источниках, аридизация климата и рост повторяемости экстремальных погодных явлений представляют сегодня основные направления климатических изменений на территории ЦФО (Курганова и др., 2017; Черенкова, 2017). Баланс углерода в почвах в засушливые годы может быть положительным и приводить к увеличению запасов углерода за счет снижения минерализационных потерь, однако, в следующие за ними более влажные годы потери углерода в результате усиления минерализации могут увеличиться, и общий баланс в почвах будет отрицательным (Borken et al., 2006; Курганова и др., 2017). Изменение баланса углерода за более длительные промежутки времени может быть совсем незначительным, поскольку реагировать на изменение погодных условий в пер-

вую очередь будет активный пул почвенного углерода, доля которого невелика (Семенов и др., 2014; Тулина, Семенов, 2015).

***Водные ресурсы.*** Средние многолетние ресурсы поверхностных вод ЦФО составляют 129 км$^3$ в год, из которых 81% формируется в пределах рассматриваемой территории.

В период современного потепления (1978-2020 гг.) общие водные ресурсы были на 11%, а местные – на 9% больше, чем в предшествующий многолетний период (1936-1977 гг.). Согласно классификации (Водные ресурсы России, 2008), удельная водообеспеченность ЦФО местными и общими водными ресурсами является низкой. Сравнивая два указанных периода, необходимо отметить, что водообеспеченность общими водными ресурсами в большинстве субъектов не меняется, за исключением г. Москва и Московской области, где она снижается. Водообеспеченность местными водными ресурсами за второй период снижается в Белгородской, Брянской. Владимирской, Воронежской, Тамбовской и Тульской областях.

Сток большинства рек рассматриваемой территории в зимний и летне-осенний периоды увеличился соответственно на 50-100% и 25-50%, а сток в период весеннего сезона снизился на 20-40% (Георгиевский и др., 2018). В результате существенно уменьшились риски опасных гидрологических явлений, связанных как с сформированием очень высоких расходов воды в период весеннего половодья, так и низких расходов в меженные периоды. Только в северо-восточной части ЦФО в последние десятилетия отмечается увеличение повторяемости высоких расходов воды в период весеннего половодья (Георгиевский и др., 2018).

***Сельское хозяйство.*** В ЦФО теплообеспеченность сельскохозяйственных культур увеличивается. Температура периода вегетации ($T > 5$ °C) за последние десятилетие повысилась на 0,6-1,2 °C при максимуме роста в летние месяцы (1,3-2,2 °C) относительно базового периода. Сумма температур за период активной вегетации (период с температурой выше 10 °C) увеличилась на ~300 °C. Продолжительность периода с температурой выше 5 и 10 °C выросла примерно на 7-10 сут., а даты перехода через 5 и 10 °C весной наблюдаются ранее климатической нормы на четыре – восемь суток.

В ЦФО наблюдается положительная тенденция к росту весенних осадков практически на всей территории. Тренды летних осадков отрицательны практически во всех областях округа, а максимальная скорость снижения отмечается в центрально-черноземных областях. Следует отметить, что тенденции к росту засушливости и в другие сезоны года также проявляются в центрально-черноземных областях. Рост засушливости территории наблюдается скорее в период вегетации яровых зерновых, чем озимых культур. С начала периода потепления ГТК Селянинова на территории региона за период май–август понизился на 15-25%, и скорость его снижения составляет –0,07 ед. за 10 лет.

Повторяемость атмосферных засух за последние 20 лет на территории округа составляет: в северных – от 10 до 15% (Костромская и Ярославская область), в центральных – от 15 до 25%, в южных областях – 25-30% (Воронежская область).

Результатом изменения агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровой

пшеницы на территории южных областей ЦФО за последнее десятилетие. Относительное снижение климатически обусловленной урожайности последнего десятилетия относительно базового периода в целом по округу составляет от 20 до 25%. В нечерноземной зоне значимого снижения урожайности за последние три десятилетия не наблюдается (≤ 10%).

В связи с увеличением теплообеспеченности и засушливости территории ЦФО усилится влияние саранчовых вредителей, в первую очередь, итальянского пруса *(Calliptamus italicus L.)*, которые могут вызвать значительные потери урожая различных сельскохозяйственных растений в южных регионах округа. Жаркая и сухая погода может способствовать и возрастанию численности опасных вредителей зерновых культур – хлебной жужелицы *(Zabrus tenebrioides)* в центрально-черноземных регионах. Увеличение теплообеспеченности территории приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей, таких как вредная черепашка, жуки-щелкуны, капустная белянка. Также увеличится численность и вредоносность колорадского жука *(Leptinotarsa decemlineata)* на картофеле, в том числе за счет увеличения числа сезонных генераций.

***Добывающая промышленность.*** ЦФО обладает развитой минерально-сырьевой базой. На территории округа находится 584 месторождения, представленных 26 видами полезных ископаемых (Справка, 2021). Наиболее существенную роль в общероссийском сырьевом балансе играют запасы железных руд, которые составляют около 2/3 разведанных запасов железных руд России. Курская магнитная аномалия располагается в юго-западной части округа на площади около 160 тыс. км$^2$. Добыча бурого угля локализована в Подмосковном угольном бассейне (Тверская, Смоленская, Московская, Калужская, Тульская и Рязанская области). В северной и центральной части округа имеются также значительные запасы торфа, и производится его добыча.

Как показывают результаты многочисленных исследований (например, SREX, 2012; МГЭИК, 2014), территория, затронутая интенсивным антропогенным воздействием, более уязвима к изменениям климата. Техногенные грунты характеризуются низкой несущей способностью, легко размываются дождями и талыми водами, а при высыхании разрушаются под действием ветровой эрозии. Поэтому климатические изменения в ЦФО, выражающиеся в изменении как температурного режима (росте средней температуры воздуха в холодный и теплый периоды года, увеличении суточных максимумов температуры воздуха, возрастании пожароопасности), так и режима увлажнения (увеличении суточного максимума осадков, повторяемости периодов без осадков), создают значительные риски для объектов добывающей промышленности (особенно склонов карьеров, дренажных систем карьеров и шахт).

Во многих субъектах ЦФО отмечаются тенденции к увеличению интенсивности осадков, в частности, к возрастанию суточного количества жидких осадков. При этом одновременно и растет число дней без осадков в теплый период года. В качестве примера на рис. 3.1.1.4 представлено изменение значений этих характеристик в 1960-2020 гг., по данным метеостанции Брянск.

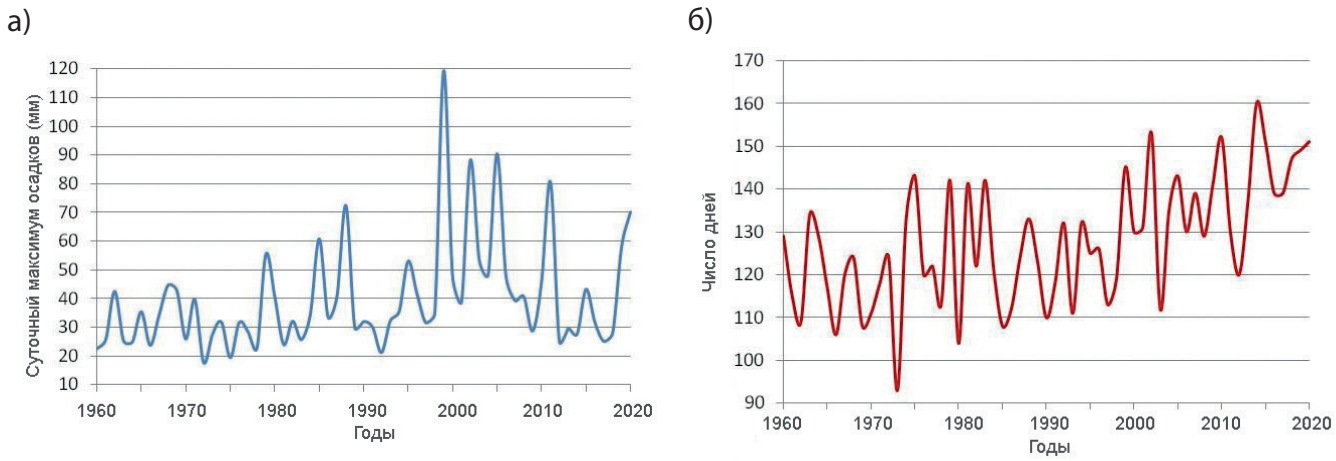



***Рис. 3.1.1.4*** *Изменение режима увлажнения в 1960-2020 гг. Брянск: а) суточный максимум осадков, мм; б) Число дней без осадков в теплый период года (апрель-октябрь)*

Следствием более интенсивных осадков может стать усиление оползней и обвалов в карьерах и шахтах, их затопление из-за сбоев в работе систем водоотведения, нарушение гидрологического режима хвостохранилищ. С другой стороны, более частые засушливые периоды способствуют высыханию и пылению терриконов и хвостохранилищ (см. главу 2.3.1). Увеличение числа дней без осадков в сочетании с ростом температуры в теплый период года приводит к возрастанию пожароопасности, что обуславливает значительные риски для торфоразработок и прилегающих к ним территорий и населенных пунктов. Увеличение числа суток с II-V классом пожарной опасности по комплексному показателю Нестерова к концу века может составить в среднем по округу от 6 до 11 суток (Торжков и др., 2019). Прогнозные оценки (Катцов и др., 2020) показывают, что к середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (рис. 3.1.1.3б, г, 3.1.1.6б, в, г).

***Транспорт.*** ЦФО располагает развитой транспортной системой. Отмечается высокая плотность железных и автомобильных дорог. От Москвы лучами расходятся в разных направлениях 11 железных дорог. В округе имеется густая сеть автомобильных дорог разного подчинения, т.к. он занимает выгодное географическое положение и по его территории проходят транзитные автотранспортные коридоры в направлениях север-юг и запад-восток. Большое значение имеют водные пути, благодаря наличию единой глубоководной системы Волго-Балтийского, Московско-Волжского и Волго-Донского каналов. В ЦФО 28 аэродромов и 11 международных аэропортов. В пределах округа развит трубопроводный транспорт, представленный системой нефте- и газопроводов.

Значительную угрозу для транспортной инфраструктуры округа представляют прогнозируемый рост летних температур, и, соответственно, повторяемости и интенсивности периодов с экстремально высокими температурами (Стадник и др., 2020).

Наиболее пострадают от роста экстремальных температур южные области региона (Курская, Брянская, Воронежская). В условиях большой загруженности автодорог, характерной для данного региона, такие температуры вызовут их быстрое разрушение, увеличение колейности. Для железнодорожного транспорта жара также достаточно

опасное явление, требующее ограничения скорости поезда, что приводит к значительным сбоям в расписании (пока это единственный способ снижения риска схода с рельсов из-за искривления железнодорожного полотна).

Ожидается рост повторяемости гололедно-изморозевых отложений на дорогах, связанных с повышением зимних температур, увеличением числа случаев перехода температуры воздуха через ноль (рис. 3.1.1.5в) и количества осадков холодного периода. В настоящее время почти вся территория округа, за исключением Костромской и Ярославской областей, находится в зоне высокой опасности и риска образования гололедно-изморозевых отложений.

На фоне сокращения количества осадков теплого периода для центральных и южных областей ЦФО, здесь отмечаются тенденции к увеличению интенсивности осадков (Хлебникова и др., 2019б), в частности, к возрастанию суточного количества жидких осадков (рис. 3.1.1.6б). Ливневые осадки в Москве уже сейчас иногда приводят к необходимости закрытия аэропортов в связи с затоплением взлетной полосы, а в дальнейшем частота таких форсмажорных обстоятельств будет только расти.

Северным областям округа (Смоленской, Тверской и Ярославской) угрожает рост паводковой опасности в связи с увеличением здесь количества осадков в летний период. Паводки приносят большие убытки транспортной инфраструктуре в связи с возможным затоплением низких участков дороги и размывом дорожного полотна.

Изменения климата не окажут существенного влияния на водный транспорт региона – большинство судоходных рек (притоков Волги) находятся в подпоре от волжских водохранилищ, и поэтому изменение их водности не приведет к росту глубин и изменению условий судоходства (Смолина, 2009).

***Производство и передача энергии.*** Ведущая роль в производстве электроэнергии в ЦФО принадлежит тепловым электростанциям (71%). Наиболее крупными из них являются Костромская, Рязанская и Конаковская ГРЭС. На долю АЭС приходится 25,6% в структуре мощности электростанций округа. Атомная энергетика ЦФО является самой мощной в энергосистеме России и включает пять АЭС (Курскую, Смоленскую, Калининскую, Нововоронежскую, Нововоронежскую-2). Изменение климата оказывает значительное влияние на безопасное и эффективное функционирование АЭС и ТЭС. Наиболее уязвимыми к изменению температурно-влажностного режима оказываются системы охлаждения энергоблоков электростанций (см. главу 2.3.5). Увеличение интенсивности, продолжительности и повторяемости волн тепла и периодов без осадков может привести к уменьшению выработки электроэнергии и даже остановке энергоблоков, как это произошло на ряде АЭС летом 2010 г., когда температура наиболее жаркой пятидневки превысила базовые значения 1961-1990 гг. на 5-10 °С. При этом температура охлаждающей воды достигала 38-40 °С. Наибольшие климатические риски для работы ТЭС и АЭС характерны для юга ЦФО, в частности, для Курской и Воронежской областей. Средняя продолжительность самой длинной в году волны тепла в этом районе за последние 60 лет изменилась от 5-7 до 10-12 дней, годовое число волн тепла в теплый период года также значительно возросло (Тюсов и др., 2017).

В связи с изменением температурно-влажностного режима на территории округа возрастет вероятность высокой пожароопасно-

сти и смерчей, представляющих значительную угрозу для агрегатов электростанций и ЛЭП, осуществляющих внешнее электроснабжение станций. Прогнозные оценки (Катцов и др., 2020) показывают, что к середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (рис. 3.1.1.5г, е).

В ЦФО возобновляемые источники энергии не являются важной составляющей энергетического комплекса. Доля альтернативной энергетики в объеме производимого электричества составляет 0,066% (Двинин, 2012). По данным (Атаев, 2016), экономический потенциал возобновляемых ресурсов в округе имеет достаточно высокие показатели. Ресурсы солнечной энергии оцениваются в 2,61 млрд кВт•ч (ежегодного возобновления), ветровые ресурсы – 1,4, ресурсы биомассы – 23,1, геотермальные ресурсы – 1,5 млрд кВт•ч.

Природный солнечный потенциал ЦФО, характеризующийся продолжительностью солнечного сияния за год и суммарным годовым приходом солнечной радиации на земную поверхность, составляет в северных областях 1700-1800 часов и 1050-1080 кВт·ч/м$^2$ соответственно, в южных районах продолжительность солнечного сияния возрастает до 1900-2000 часов, а годовой приход суммарной радиации до 1100-1150 кВт·ч/м$^2$.

Ветровой потенциал территории ЦФО также не является очень высоким. Преобладающие средние годовые скорости ветра находятся в пределах 2,7-3,9 м/с. Вероятность энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с) – 35-45%, в отдельных районах до 60%. Несмотря на невысокие ветровые ресурсы, в ЦФО введены в эксплуатацию пять ветрогенераторов. Мощность каждого объекта составляет 0,1 МВт.

Энергосистема ЦФО является самой крупной в России и входит в зону централизованного энергоснабжения Российской Федерации. Согласно (СП, 2016), территория ЦФО в основном относится ко II гололедному району (за исключением Смоленской, Брянской и Воронежской областей, которые относятся к III району). Однако даже незначительные гололедные отложения совместно с ветром могут создавать нагрузку, приводящую к отключению электроэнергии. На территории округа нередко наблюдаются ледяные дожди, которые создают дополнительную нагрузку на провода воздушных линий и приводят к серьезным авариям. Например, в декабре 2010 года ледяной дождь, выпавший в Москве, Московской области и ряде соседних областей, привел к массовым отключениям электроэнергии. В Московской, Владимирской, Тверской, Смоленской областях длительное время оставались без электроэнергии около 400 тыс. человек.

Ежегодно во всем ЦФО наблюдаются явления, связанные с ветром, гололедно-изморозевыми отложениями и грозами, наносящими ущерб. Определенной тенденции к увеличению числа случаев с этими явлениями не наблюдается, однако для бесперебойной эксплуатации ЛЭП необходимы постоянный контроль за возникающими метеорологическими нагрузками вдоль высоковольтных линий и уточнение климатических параметров в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных наблюдений последних лет по репрезентативным метеостанциям.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Изменения климата оказывают неоднозначное воздействие на функционирование ЖКХ в регионе. В силу высокой плотности населения на территории округа эти изменения имеют серьезные экономические последствия. Центральное место в системе ЖКХ занимает коммунальная энергетика, обеспечивающая функционирование

систем теплоснабжения и электроснабжения во все сезоны года. Уже в настоящее время величина градусо-суток отопительного периода (ГСОП), являющаяся индексом теплопотребления, уменьшается в регионе со скоростью 100-150 °С•сут./10 лет. К середине XXI века продолжительность отопительного периода сократится на 15-20 дней и более (рис. 3.1.1.5а). Величина ГСОП (рис. 3.1.1.5б) уменьшится на 800-1200 °С•сут. (в наибольшей степени – на востоке округа, в Костромской области). Такие изменения могут привести к потенциальному уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года более чем на 15% по отношению к базовым значениям конца XX века. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий и препятствующими энергосбережению. При отсутствии модернизации сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов.

В летний сезон ожидается значимое увеличение числа жарких дней (рис. 3.1.1.5г) и такого показателя как дефицит холода (рис. 3.1.1.5д), являющегося индексом энергопотребления в летний сезон и свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. Наибольшее увеличение дефицита холода ожидается в Белгородской и Воронежской областях (300 °С•сут. и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, наиболее выраженной в западных районах округа (рис. 3.1.1.5в). Эта тенденция приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение количества зимних осадков, в особенности, выпадающих в период оттепелей.

Изменение режима атмосферных осадков на территории округа негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.1.6а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. Рост экстремальности осадков будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.1.6в, г), что может привести к проблемам с водообеспечением.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ. Однако, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным

климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур (рис. 3.1.1.5е).

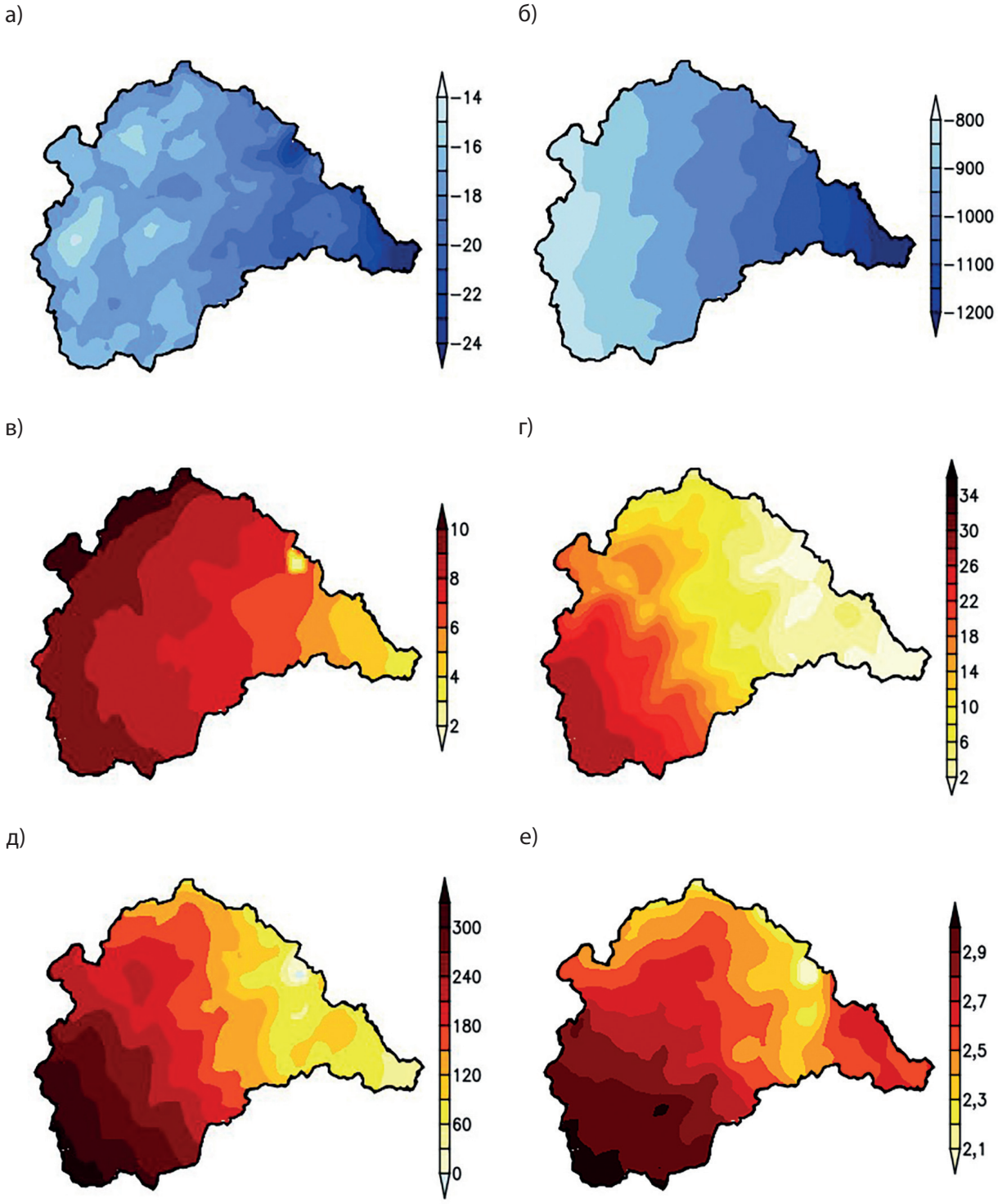



***Рис. 3.1.1.5*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории ЦФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) продолжительность отопительного периода (дни); б) градусо-сутки отопительного периода (°С•сут.); в) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С (дни); д) дефицит холода (°С•сут.); е) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

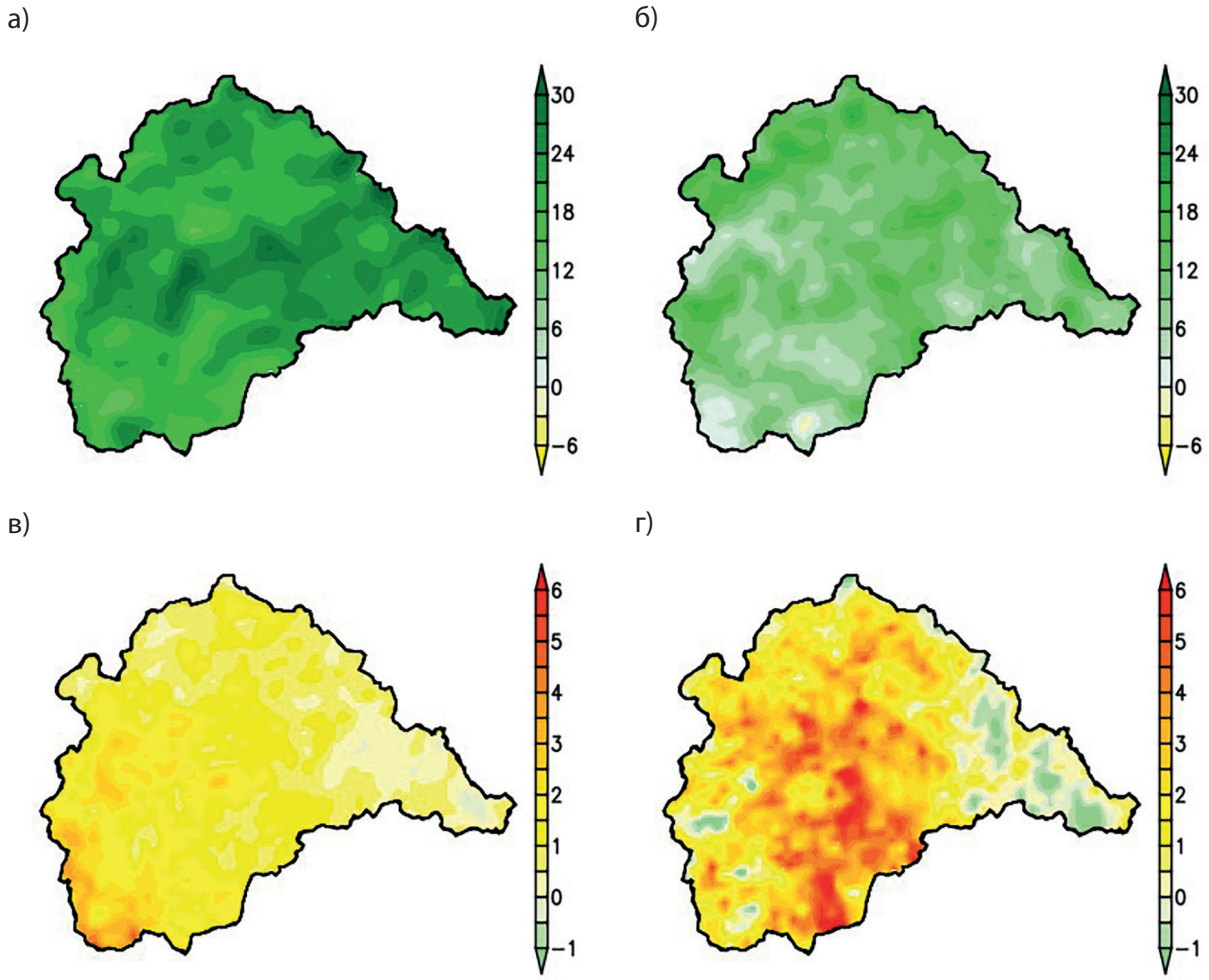



***Рис. 3.1.1.6*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории ЦФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная продолжительность (дни) непрерывного периода с осадками менее 1 мм/сутки (теплый сезон); г) максимальная продолжительность (дни) непрерывного периода с осадками менее 5 мм/сутки (теплый сезон). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

***Туризм.*** Территория ЦФО включает два туристических района: Центральный (Московская, Владимирская, Смоленская, Брянская, Калужская, Тульская, Ивановская и Рязанская области), и Южно-Российский (Курская, Орловская, Липецкая, Белгородская, Воронежская, Тамбовская, Пензенская области) и занимает первое место в России по интенсивности развития туризма.

В регионе представлены все виды туристической деятельности. Наиболее перспективными в регионе климатозависимыми видами туризма являются сельский, экологический, активный, водный и рекреационный, но в целом этот федеральный округ, прежде всего, является центром культурно-познавательного и делового туризма. Тем не менее, в регионе благоприятный для отдыха умеренно-континентальный климат, позволяющий развивать как зимние (с ограничениями), так и летние виды активной рекреации практически на всей территории округа: комфортный с физиологической точки зрения сезон в настоящее время здесь начинается в мае и продолжается около 120 дней, а прогнозируемое на середину столетия увеличение этого периода составит от одного месяца на севере региона до полутора на юге.

К существенным рискам, связанным с изменением климата, здесь можно отнести повышение температуры воздуха, которое окажет негативное влияние на качество основного в столичном регионе культурно-познавательного вида рекреации. Увеличение повторяемости и продолжительности волн тепла в сочетании с растущим числом дней с пожарной опасностью (Торжков и др., 2019) приведет к значительному сокращению периода, благоприятного для посещения столицы и культурных городских центров –Владимира, Ярославля и др.

Изменение климата окажет влияние и на зимние виды отдыха. К середине столетия на территории ЦФО ожидается повышение зимней температуры воздуха от 3 °С на западе региона до 5 °С на востоке.

В настоящее время именно северо-восточные области (Владимирская, Костромская и Ярославская) имеют преимущества для развития зимних видов спорта. Здесь наиболее продолжительный, с ноября по начало апреля, период с высотой снежного покрова более 20 см (с декабря более 40 см), наибольшее число дней с комфортными для активного зимнего отдыха диапазоном температур (от –20 до –5 °С). Однако начавшаяся в середине 80-х гг. тенденция уменьшения высоты снежного покрова и продолжительности его залегания сохраняется и сейчас. И хотя по прогнозу к середине столетия в этих областях ожидается рост количества осадков, при таком подъеме температуры велика вероятность, что выпадать они будут в виде дождя и мокрого снега (рис. 3.1.1.3а, в).

Благоприятен прогноз для водных видов спорта – повышение температуры воздуха продлит сезон видов рекреации, связанных с открытыми водоемами, особенно на юге ЦФО.

***Направления адаптации.*** В качестве мер по адаптации экосистем целесообразно снижение и снятие антропогенной нагрузки, в том числе через создание и расширение существующих особо охраняемых природных территорий для формирования экологических коридоров. Необходимо усиление профилактики пожаров, восстановление водного режима осушенных торфяников. Экосистемные функции лесов уже используются, их целесообразно применять для создания благоприятного микроклимата, защиты от водной и ветровой эрозии, поддержания гидрологического режима рек.

Адаптационные мероприятия в сфере водохозяйственного комплекса в ЦФО должны включать разработку актуализированных, учитывающих произошедшие изменения водного режима схем комплексного использования и охраны водных объектов для бассейнов Оки, Волги, Западной Двины, Дона и Днепра, и, соответственно, правил использования водных ресурсов крупных водохранилищ в пределах этих бассейнов. Для всех субъектов ЦФО, характеризующихся обилием малых антропогенно-нагруженных водных объектов и, особенно, для Москвы и Московской области, актуальными являются мероприятия по разработке и реализации индивидуальных и бассейновых программ по реабилитации и восстановлению водных объектов, направленных, в том числе, на снижение диффузионного загрязнения водных объектов. Дополнительные мероприятия по защите от негативного воздействия вод, кроме уже намеченных либо запланированных, должны быть проанализированы на обоснованность с учетом ожидаемого снижения максимального стока весеннего половодья.

В сельском хозяйстве увеличение сумм температур воздуха за период активной вегетации сельскохозяйственных культур позволяет пе-

рейти от выращивания раннеспелых сортов пшеницы, ячменя и других зерновых к их позднеспелым сортам, более урожайным и более эффективно использующим запасы продуктивной влаги в ранневесенний период вегетации.
Для адаптации транспортной отрасли необходима разработка новых температурных нормативов для дорожных покрытий и расширительных швов мостов. Укрепление кромок дорожных насыпей, использование стальной арматуры при строительстве дорог, повышение уровня размещения дорог, мостов и туннелей выше уровня паводковых наводнений.

В электроэнергетике особое значение приобретают обновление или модернизация всей системы энергогенерирующих объектов, включая улучшение рабочих характеристик теплообменников и систем охлаждения ТЭС и АЭС, установку кондиционеров и дополнительных охлаждающих модулей в системы вентиляции, а также резервных систем охлаждения, работающих на дизельном топливе. Для бесперебойной эксплуатации ЛЭП необходимы постоянный контроль за возникающими метеорологическими нагрузками вдоль высоковольтных линий и уточнение климатических параметров в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных наблюдений последних лет по репрезентативным метеостанциям.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства особую актуальность имеет технологическая модернизация систем теплоснабжения, которая может позволить извлечь выгоду, связанную с потеплением, путем уменьшения уровня потребления энергии в холодный сезон на 15% и более. Для поддержания оптимального микроклимата в помещениях необходимо повышение уровня инженерного обеспечения зданий с учетом роста экстремальных температур и энергопотребления в летний сезон. Изменение режима атмосферных осадков (рост интенсивности осадков, увеличение продолжительности периодов с дефицитом осадков) потребует обновления соответствующих нормативных параметров и модернизации системы водоотведения, а также принятия мер, направленных на повышение эффективности водопотребления. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий, с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

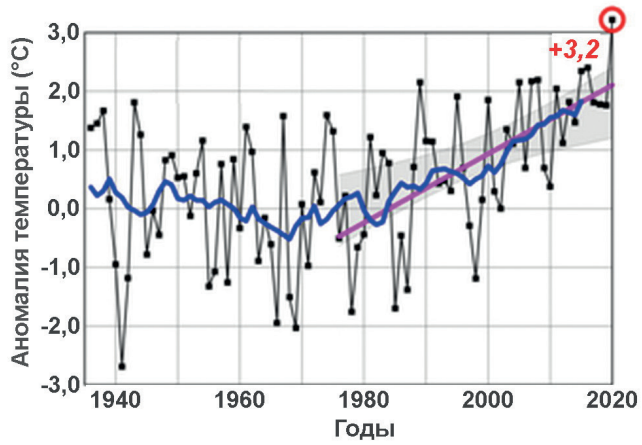
Для туристской деятельности актуальна разработка мероприятий быстрого реагирования по защите отдыхающих и туристов от воздействия жары в туристских центрах региона.

### 3.1.2 Северо-Западный федеральный округ (СЗФО)

#### 3.1.2.1 Изменения климата на территории СЗФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории СЗФО (рис. 3.1.2.1а). В период с 1960 по 2020 гг., средняя годовая температура воздуха в Мурманске и Сыктывкаре возросла примерно на 2 °С, а в Пскове на 2,5 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года, однако наиболее заметно он выражен в холодный период. Увеличение как годового количества осадков (рис. 3.1.2.1б), так и сумм осадков в различные сезоны года характерно для всей территории СЗФО.

а)




б)

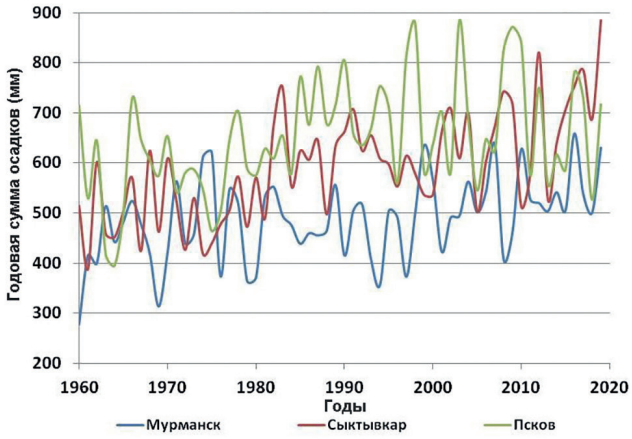
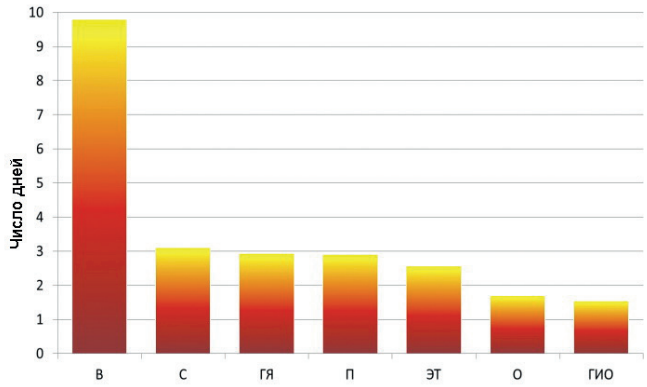



***Рис. 3.1.2.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории СЗФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм, Мурманск, Сыктывкар, Псков, за 1960-2020 гг.*

В последнее тридцатилетие на территории СЗФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с большими скоростями ветра, экстремальными снегопадами, наводнениями, высокой пожароопасностью (рис. 3.1.2.2).

а)




б)

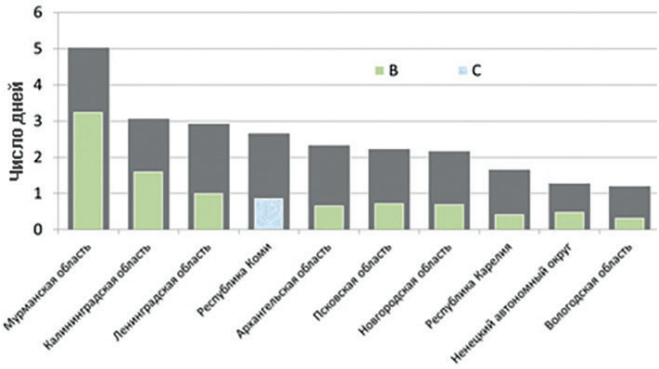



***Рис. 3.1.2.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории СЗФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов СЗФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data); В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.2.3) на всей территории СЗФО возможно повышение температуры воздуха летнего

сезона на 1-3 °С. Наибольшее потепление ожидается на побережье Северного Ледовитого океана (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом могут возрасти на 5-15%. Зимой в восточной части СЗФО возможен рост температуры воздуха на 5-10 °С, в западной части – на 3-5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на востоке СЗФО может составить 40-60%, на западе округа – 20-30%.

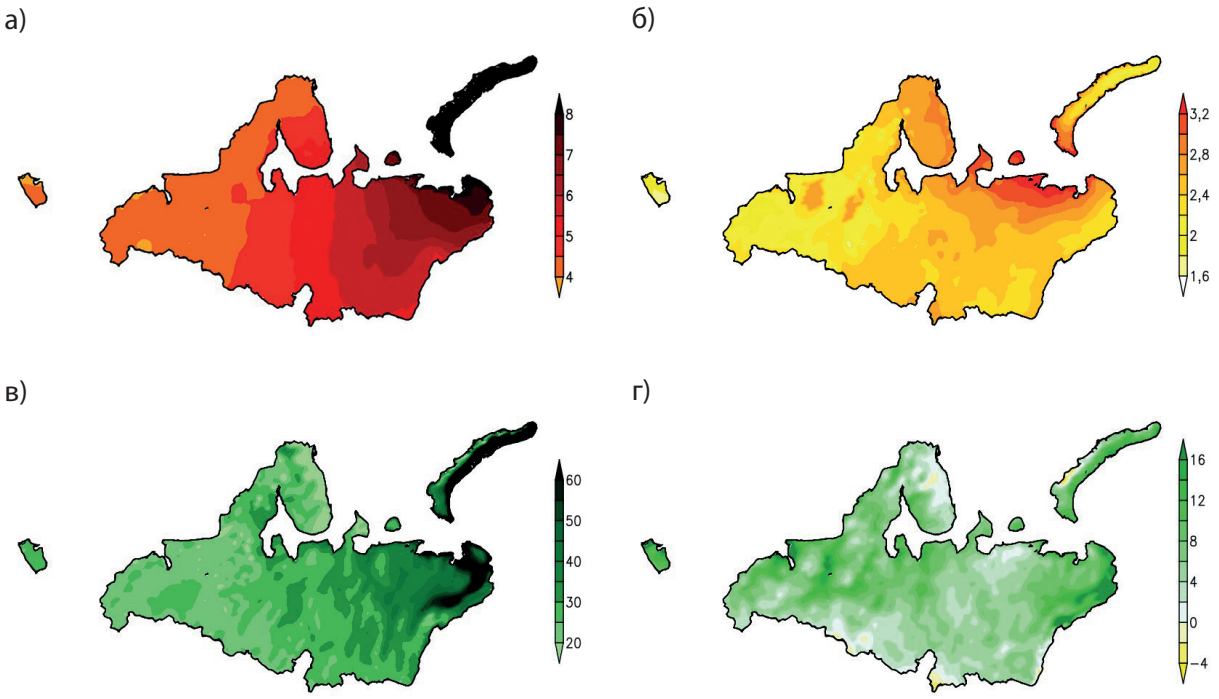



***Рис. 3.1.2.3*** *Изменение средней температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории СЗФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.2.2 Природные системы и экономика СЗФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** СЗФО лежит в пределах восточноевропейских тундровых и бореальных (таежных) экосистем. Большая часть территории равнинная, на ней развиты гипоарктические южные тундры, лесотундра и северная тайга, сменяющиеся к югу восточноевропейскими еловыми, сосновыми средне- и южнотаежными лесами. Небольшие по площади территории Хибин, Полярного Урала, Новой Земли заняты горными тундрами. Северные островные экосистемы Земли Франца-Иосифа, Новой Земли представлены ландшафтами высокоарктических тундр, полярных пустынь и ледников.

Уже отмечено и прогнозируется дальнейшее изменение границ природных зон: продвижение деревьев вверх по склонам в Хибинах в 1958-2008 гг. составило 29 м для березы и 27 м для сосны (Mathisen et al., 2014); сдвиг верхней границы леса в 1956-2019 гг. составил 40-51 м для горных массивов (Моисеев и др., 2019); зафиксировано расширение к северу очагов лесной растительности в низовьях реки Печора (Белоновская и др., 2016).

Малые ледники Хибин, считавшиеся ранее исчезнувшими, сохранились в виде снежников,

площадь которых значительно варьирует в зависимости от погодных условий конкретного года (Викулина и др., 2021).

По климатическим параметрам становится возможным выход таежной растительности к океану вплоть до южного острова Новой Земли (Anisimov et al., 2017). Площади территорий, соответствующих современным условиям высокоарктических тундр и полярных пустынь, могут сократиться до минимума на островах, южная часть округа будет пригодна для южной тайги, а на западе появятся территории, благоприятные для развития смешанных и широколиственных лесов (Жильцова, Анисимов, 2015).

Изменение видового разнообразия и ареалов растений и животных подтверждается многочисленными данными наблюдений. Повышение температуры в августе и увеличение вегетационного периода способствуют как увеличению, так и сокращению численности популяций отдельных видов растений (Пучнина, 2017). В Карелии в 1998-2015 гг. отмечено уменьшение видового разнообразия лишайников, а также увеличение доли более засухоустойчивых видов. Эффект связывается с усилением аридизации (Тарасова, Горшков, 2019). В орнитофауне отмечается сокращение доли северных видов и увеличение южных (Симонов, Матанцева, 2020). В Карелии дальше всего прошли на север и закрепились в зоне нерегулярного гнездования чомга, камышница, белый аист, луговой лунь, большой веретенник, озерная и малая чайки, обыкновенная горлица, трещотка, соловьиный сверчок, славка, черноголовка и др. В северо-восточном направлении продвинулись западные виды: бормотушка, белоспинный дятел и черный дрозд (Хохлов и др., 2018). С 2015 г. на севере Архангельской области, в Ненецком автономном округе и на Новой Земле зафиксированы залеты восьми новых видов: чомги, лебедя-шипуна, серой утки, красноголового нырка, каменушки, мандаринки, лысухи и белой лазоревки (Спицын и др., 2018). Триггером изменений выступают не только климатические факторы, но и антропогенная трансформация ландшафтов (урбанизация, вырубки, пропашное земледелие) (Кочанов, 2018). Ряд морских птиц также расширяет ареал на север и восток (северная олуша и большой поморник), или продвигается на север вдоль Новой Земли (галстучник, камнешарка, тупик, большой крохаль, серебристая чайка, лесной гуменник и др.) (Тишков и др., 2020).

Изменения фенологических дат отмечаются для отдельных видов птиц и растений. Наблюдается смещение дат начала цветения и рассеивания семян у позднецветущих видов растений на более ранние сроки на 2-7 дней (Каримова и др., 2019). Для березы бородавчатой, черемухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной в центральной части ЕТР происходящие климатические изменения пока не оказывают критического влияния на сезонное развитие (Минин и др., 2018). У птиц в Архангельской области сдвигается на более ранние сроки начало размножения (Яковлева, 2020).

Отмечается увеличение продуктивности таежных экосистем, в том числе за счет продолжительности вегетационного периода (Matskovsky et al., 2020). На верхней границе леса в Хибинах надземная фитомасса увеличилась в среднем с 0,1 до 17,8 т/га (Моисеев и др., 2019). Сопоставлением данных дистанционного зондирования 2000 и 2014 гг. выявлено формирование продуктивных древесно-кустарниковых покровов вдоль побережья Чешской губы, междуречий рек Ома, Индига и Пеша в Малоземельской тундре (Белоновская и др., 2016). В переходной

зоне лесотундры выделяются четыре района с наибольшими значимыми положительными изменениями NDVI (нормализованный относительный индекс растительности): Кольский полуостров, западная часть Большеземельской тундры, Западная и Восточная Сибирь (Титкова, Виноградова, 2019). Для островов Колгуев и Вайгач отмечается максимальный для Российской Арктики рост значений NDVI: 15% и 30% соответственно (Тишков и др., 2018). Прогнозируется дальнейшее увеличение продуктивности экосистем, связанное со сменой биомов (Жильцова, Анисимов, 2015; Anisimov et al., 2017).

Отмечается сокращение численности арктических видов, связанное как с неблагоприятными погодно-климатическими условиями, так и с усиливающейся конкуренцией (Тишков и др., 2018). Насекомые-фитофаги при, казалось бы, благоприятном повышении температур, испытали резкое падение численности некоторых групп, что было связано с резким увеличением смертности от естественных врагов (Козлов и др., 2019).

Уязвимость экосистем к изменению климата связана в первую очередь с летними ветровыми событиями и биогенными факторами, в меньшей степени – с лесными пожарами. Ожидается дальнейшее усиление ветрового воздействия, умеренный рост воздействия пожаров, биогенных факторов (см. главу 2.1.1). Занимая значительные площади, болота и заболоченные местообитания по-разному реагируют на изменение климата в зависимости от своих природных особенностей (прежде всего водного питания) и географических условий. На Севере таяние мерзлоты усиливает процессы заболачивания и меняет пространственную структуру полигональных и бугристых болот. Растет облесение болот лесотундры, открытых и редколесных болот таежной зоны. Растет вероятность торфяных пожаров, особенно в случае заброшенных осушенных торфяников (Sirin et al., 2017, 2018; Сирин и др., 2019). В Мурманской области с 1958 по 2018 гг. прослеживается тенденция увеличения числа лесных пожаров, вызванных грозами (Князев, Исаева, 2019).

Изменение температурного режима озер Карелии за последние 60 лет привело к снижению количества осенненерестующих лососевых и сиговых видов рыб и увеличению теплолюбивых фаунистических комплексов (Георгиев, 2014; Терентьев и др., 2017).

***Баланс почвенного углерода.*** Благодаря высокому разнообразию природных биомов в пределах СЗФО – от полярных пустынь до южной тайги, запасы углерода в почвах верхнего тридцатисантиметрового слоя изменяются от 26 до 113 т С/га (Национальный доклад, 2018). В целом по округу общие запасы углерода в том же слое на землях, покрытых лесом, составляют 8,07 Гт С при скорости прироста запасов углерода около 2,15 млн т С/год (Замолодчиков и др., 2018). В республике Коми самые высокие запасы углерода среди почв были характерны для оторфованных подзолов и составляли 127 т С/га в слое 0,0-1,0 м (Osipov et al., 2021).

Дыхание почв на территории округа определяется их зональной приуроченностью, а в лесных почвах зависит от породного состава древостоя. На Кольском полуострове общее дыхание почв за вегетационный сезон изменяется от 200 г С/м$^2$ в сосняках до 420-460 г С/м$^2$ в ельниках и березняках (Кадулин, Копцик, 2021). В среднетаежном старовозрастном ельнике (Республика Карелия) годовое дыхание почв оценивается в 639 ± 6 г С/м$^2$ (Мошкина и др., 2021). Вклад корневого дыхания в лесах разно-

го породного состава варьирует от 20 до 70%. Большую роль в формировании общего дыхания с поверхности почв таежных лесов округа играют крупные древесные остатки – дебрис (Алферов и др., 2017; Mamai et al., 2018).

Большое влияние на баланс углерода в лесных почвах СЗФО оказывают вырубки (Дымов, Милановский, 2014). Влияние пожаров на запасы углерода не было существенным, но в почвах фитоценозов, пройденных пожаром, уменьшается вклад подстилки в общие запасы углерода (Дымов и др., 2015). В результате потепления климата и вызванных им эпидемий корневой губки и жуков-ксилофагов обнаружено усиление эмиссии $CO_2$ из почв в зоне южной тайги (Карелин и др., 2017б).

Рост температуры воздуха и уменьшение количества осадков могут приводить к уменьшению запасов углерода за счет усиления минерализационных потерь. Аналогичное влияние на баланс углерода в почвах будут оказывать увеличивающиеся риски пожаров и расширение масштабов поражения лесов насекомыми-вредителями (Национальный доклад, 2018).

***Водные ресурсы.*** Средние многолетние водные ресурсы СЗФО составляют 590 км$^3$ в год, из которых 90% формируется в пределах рассматриваемой территории, а только 10% поступают с сопредельной территории. В среднем за период 1978-2020 гг. общие и местные водные ресурсы, удельная водообеспеченность территории и населения были на 9% больше, чем в предшествующий многолетний период.

Удельная водообеспеченность территории округа при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 350 тыс. м$^3$ в год, при местных – 316 тыс. м$^3$ в год, а удельная водообеспеченность населения равна соответственно 44,0 тыс. м$^3$/год и 39,8 тыс. м$^3$/год (категория водообеспеченности – очень высокая). В СЗФО нет ни одного субъекта, в котором бы водообеспеченность общими водными ресурсами снижалась до 10 тыс. м$^3$/чел. – критерия средней водообеспеченности, однако величина водообеспеченности местными водными ресурсами ниже 5 тыс. м$^3$/чел. отмечается в Ленинградской и Калининградской областях и оценивается как низкая. Во всех субъектах, за исключением Ленинградской и Калининградской областей, в современный период водообеспеченность увеличилась за счет увеличения стока и снижения численности населения.

Сток крупнейших рек СЗФО – Печоры и Северной Двины в 1978-2020 гг. был больше, чем в 1936-1977 гг., соответственно, на 17 и 5%. Увеличение частоты формирования максимальных расходов воды малой обеспеченности, являющихся причиной наводнений, наблюдается в последние десятилетия на весьма ограниченном числе рек, расположенных в верхней части бассейна Северной Двины и в бассейне Ладожского озера (Георгиевский и др., 2019).

***Сельское хозяйство.*** В СЗФО наблюдаются рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, увеличение продолжительности периода вегетации (T > 5 °C) и увеличение сумм температур воздуха за период с температурой, превышающей 10 °C. Температура воздуха весенне-летнего периода растет со скоростью 0,4-0,6 °C за десятилетие. Скорость роста температуры воздуха выше в северных областях и ниже в южных. Скорость роста сумм температур воздуха выше 10 °C составляет примерно 100 °C за десятилетие. Устойчивый переход температуры через 10 °C весной, наблюдаемый по климатической норме в конце второй – на-

чале третьей декады мая в северных областях (в пределах земледельческой зоны), сдвинулся на более ранние сроки (на четыре – шесть дней). Увеличивается повторяемость оттепелей зимой и заморозков весной.

По условиям увлажнения регион относится к влажной зоне и условия влагообеспеченности сельскохозяйственных культур за последние два десятилетия не претерпели существенных изменений. Суммарное количество осадков в весенний период имеет тенденцию к повышению, но в летний период тренды осадков практически отсутствуют. Территория региона достаточно хорошо увлажнена, в отдельные годы наблюдается опасное природное явление «Переувлажнение почвы».

В настоящее время вклад СЗФО в зерновой баланс составляет менее 1% от валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по России. Рост обеспеченности теплом и увеличение продолжительности вегетационного периода при достаточной увлажненности территории существенно расширяют возможности для развития высокоинтенсивного сельского хозяйства в этом регионе. Увеличение доз органических удобрений для улучшения питания растений и воспроизводства плодородия почв будет способствовать увеличению урожайности сельскохозяйственных культур в регионе.

При сохранении наблюдаемых темпов потепления в регионе должны улучшаться условия для животноводства в результате роста кормовой базы и сокращения периода стойлового содержания скота. Ожидается повышение продуктивности сенокосов и пастбищ, в том числе и за счет увеличения продолжительности безморозного периода.

Увеличение увлажненности территорий СЗФО на фоне повышения теплообеспеченности будет способствовать развитию различных грибных и бактериальных заболеваний сельскохозяйственных культур (фитофтороз (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary), фузариоз (*Fusarium spp.*), ржавчины, головни, различные бактериозы и гнили). Увеличение сумм эффективных температур приведет также к усилению вредоносности колорадского жука.

***Добывающая промышленность.*** Территория СЗФО богата полезными ископаемыми. К наиболее важным отраслям добывающей промышленности округа относится добыча нефти и газа (месторождения в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и на шельфе Баренцева моря), угля (Печорский бассейн), железной руды и руд цветных металлов (Мурманская область, Республика Карелия, Ленинградская область).

В условиях изменения климата, сложные производственные процессы нефте- и газодобычи, включающие геологоразведку, бурение и строительство скважин, их ремонт, очистку добытой нефти от примесей, становятся особенно уязвимы как для опасных гидрометеорологических явлений (экстремальных ветровых и гололедных нагрузок, сильных дождей, повышенной пожароопасности и т.д.), так и для последствий медленных климатических изменений (роста уровня моря, разрушения морских побережий и прибрежной инфраструктуры, деградации многолетнемерзлых пород) (см. главы 2.3.1 и 2.3.8). Сложности при разработке месторождений на шельфе связаны с низкими температурами воздуха, ледовыми условиями, необходимостью соблюдения более жестких экологических требований (Калабина, Зворыкина, 2019).

Как отмечалось в главе 2.3.1, изменения климата в Арктике имеют как отрицательные, так и положительные последствия для добычи полезных ископаемых. Наблюдаемое и ожидаемое в будущем повышение температуры воздуха на территории СЗФО, способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако связанное с потеплением таяние льдов может привести к росту айсберговой и штормовой активности в Арктическом бассейне. Это затруднит добычу полезных ископаемых на шельфе, а также будет способствовать дальнейшей абразии морских побережий. Кроме того, рост температуры воздуха и уменьшение числа дней с отрицательными температурами обуславливает увеличение пожароопасности в этом регионе, что создает дополнительные риски для нефте- и газодобычи. Следствием изменения температурно-влажностного режима, особенно выраженного в северной части округа, является и усиление коррозионной агрессивности атмосферы (см. главу 2.3.1), сокращающей эксплуатационный ресурс нефтегазового оборудования.

Важным фактором, влияющим на добычу газа, является повторяемость температуры воздуха выше 15 °С, при которой происходит уменьшение добычи топлива из-за падения мощности компрессорных станций. В районе Вуктыльского газового месторождения, дающего 90% добычи газа СЗФО, продолжительность периода с такой температурой в последнее десятилетие увеличилась примерно на 10 дней по сравнению с 1961-1990 гг.

Влияние изменения климата на добычу угля в целом носит также негативный характер. Добыча угля в Печорском бассейне (Воркута, Инта) ведется подземным способом в условиях многолетней мерзлоты. Деградация многолетнемерзлых пород в этом районе создает дополнительные риски аварий на шахтах в результате обрушения горных пород. Погодно-климатические риски при открытом способе добычи полезных ископаемых (например, железной руды в Мурманской области и Карелии, бокситов в Ленинградской области, бокситов и каменного угля в Республике Коми) обусловлены возможным усилением оползневых процессов в карьерах из-за возрастания количества осадков и повторяемости значительных (более 1 мм) суточных сумм осадков, а также удлинения периода формирования оползней в связи с увеличением числа дней с положительной температурой воздуха и почвы. Изменение температурно-влажностного режима создает и дополнительные экологические риски для функционирования хвостохранилищ. Прогнозные оценки (Катцов и др., 2020) показывают, что к середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (рис. 3.1.2.3б, г, 3.1.2.4а, 3.1.2.5б, г).

В этих условиях для обеспечения эффективной и безопасной работы горнодобывающих предприятий необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

***Транспорт.*** Благодаря уникальному географическому положению и непосредственной близости к странам ЕС, через СЗФО проходит существенная доля международных грузов страны в рамках международных транспортных коридоров. Здесь достаточно развитая сеть железных и автомобильных дорог. Морской транспорт играет важную роль особенно в труднодоступных районах Крайнего Севера.

Внутренний водный транспорт имеет важное значение для Архангельской области, Республики Коми и Ненецкого автономного округа, где сеть железных и автомобильных дорог недостаточно развита. Регионы севернее Полярного круга, включают целый ряд районов, доступность которых обеспечивается только посредством воздушного транспорта. В Республике Коми, Архангельской и Мурманской областях, Ненецком автономном округе обслуживание отдаленных населенных пунктов осуществляется преимущественно воздушным транспортом. Аэропортовый комплекс включает в себя 66 аэропортов, в том числе семь международных.

Наиболее благоприятно скажется изменение климата на функционировании внутреннего водного транспорта. Прогнозируемое увеличение среднегодовой температуры повлечет за собой удлинение навигации на всех реках севера региона в пределах одного месяца. По некоторым оценкам (Смолина, 2009), возрастет зимний меженный сток за счет увеличения продолжительности периодов оттепелей и повышения грунтового питания. Снизится доля весеннего половодья в общем объеме стока воды (примерно с 60 до 50%), возрастет сток в летне-осеннюю межень за счет увеличения доли жидких осадков (с 65 до 70-75% по отношению к годовой сумме). В целом на севере региона ожидаются благоприятные условия и для морского судоходства в связи с уменьшением ледовитости Белого и Баренцева морей и увеличением ежегодного периода с открытой водой, свободной ото льда, что будет определять удешевление морских перевозок в Арктике. Все это положительно скажется на условиях судоходства. В Новгородской, Ленинградской, Вологодской областях и на юге Архангельской области повышение зимних температур может оказать положительное влияние на эксплуатационную надежность транспортных средств. Затраты на содержание, техническое обслуживание и ремонт, расходные материалы и запасные части будут уменьшаться ввиду снижения частоты отказов техники.

К неблагоприятным факторам относятся:

- сокращение времени использования зимних дорог (зимников) на севере региона. Повышение температуры воздуха в зимний период и более частые оттепели приведут к регулярному оттаиванию «зимников» в начале и конце зимы, что влечет за собой возникновение аварийных ситуаций;
- более частое возникновение гололедицы на дорогах, связанное с увеличением чередования оттепелей и заморозков и, как следствие, повышение числа аварий, снижение пропускной способности и больший износ дорог (рис. 3.1.2.46);
- рост повторяемости сильных паводков и ледовых заторов, вызывающих разрушение дорог и мостов, т.к. на территории СЗФО к середине XXI века рост повторяемости и интенсивности волн тепла неблагоприятно скажется на состоянии и условиях эксплуатации автомобильных и железных дорог в Новгородской и Псковской областях.

***Производство и передача энергии.*** Электроэнергетические мощности округа включают две атомных электростанции – Ленинградскую и Кольскую, тепловые электростанции (наиболее крупная Киришская ГРЭС), гидроэлектростанции. Основная доля (65,5%) генерирующих мощностей приходится на тепловые электростанции, работающие на органическом топливе. На атомные электростанции приходится 23,5% установленной мощности, на гидроэлектростанции – 11%. При изменении климата основными угрозами для ТЭС и особенно

АЭС являются выход из строя оборудования станций и снижение их КПД из-за аномально высоких температур воздуха и чрезмерного нагрева воды, используемой для охлаждения энергоблоков (см. главу 2.3.5). Кроме того, представляет опасность повреждение линий электропередач, по которым осуществляется внешнее энергоснабжение электростанций, при воздействии высоких ветровых и гололедных нагрузок, а также лесных пожаров. Так, например, 16 июля 2010 года была наполовину снижена мощность энергоблока № 3 Ленинградской АЭС в связи с отключением от сети турбогенератора из-за неисправности в системе охлаждения, возникшей в условиях длительной аномальной жары. В июле-августе 2010 года температура наиболее жаркой пятидневки в районе ЛАЭС превышала значения этого показателя для периода 1961-1990 гг. на 8 °С, а расчетные значения 98%-й обеспеченности – на 3 °С. Длительные периоды с экстремально высокими температурами в последние 30 лет стали носить регулярный характер (Тюсов и др., 2017).

Результаты сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима говорят о вероятном усилении наблюдаемых тенденций (рис. 3.1.2.3б, 3.1.2.4д, 3.1.2.5г). К середине XXI века в южной части СЗФО длительность наиболее продолжительной волны тепла может увеличиться на восемь – девять дней, а повторяемость пятидневных периодов с температурой выше 95%-й обеспеченности, рассчитанной для 1990-1999 гг., возрастет в два – три раза (Shkolnik et al., 2018; Тюсов и др., 2017). В связи с изменением температурного режима также ожидается рост повторяемости периодов с повышенной пожароопасностью. Возрастание числа суток с классом пожарной опасности II-V по комплексному показателю Нестерова к концу XXI века может составить на территории СЗФО от 6 до 11 суток (Торжков и др., 2019).

Для адаптации ТЭС и АЭС к климатическим изменениям необходимо совершенствование конструкций электростанций с учетом наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений специализированных климатических параметров с целью снижения рисков аварий и повышения эффективности генерации энергии.

В СЗФО, занимающем практически всю северную часть Европейской территории России, имеются области с недостаточно развитой системой линий электропередач и транспортных коммуникаций. Кроме того, в регионе расположено немало труднопроходимых болот. Вследствие всех этих обстоятельств, многим населенным пунктам, расположенным в данной местности, остро необходимы локальные источники энергии, которые могли бы генерировать ее, работая в автономном режиме, и при этом имели бы возможность обходиться без привозного топлива.

Очевидно, что подобные энергетические потребности легче всего удовлетворить за счет относительно малых генерирующих мощностей с использованием возобновляемых источников энергии. На Северо-Западе России есть природный ресурс и технический потенциал для внедрения возобновляемых источников энергии, особенно биоэнергетических и ветровых.

Развитие солнечной электроэнергетики в СЗФО при современном уровне технологий малоперспективно в связи с климатическими особенностями. Годовая продолжительность солнечного сияния менее 1200 часов в северных областях округа и 1700 часов в южных, суммарный годо-

вой приход солнечной радиации, соответственно, 850 и 1050 кВт·ч/м$^2$. Прямое использование солнечной энергии на Северо-Западе Российской Федерации целесообразно для осуществления низкотемпературных процессов, таких как нагрев воды с помощью солнечных тепловых коллекторов с последующим применением ее в системах горячего водоснабжения, рассчитанных на сезонный цикл пользования. Возможно получение небольших количеств электроэнергии с помощью фотоэлектрического преобразования солнечного излучения для локального потребления отдельных домов и коттеджей.

В СЗФО есть природный ресурс и технический потенциал для внедрения ветровых возобновляемых источников энергии. Округ характеризуется высоким уровнем теоретического (природно-климатического) потенциала ветровой энергии, однако ветроэнергетика СЗФО находится в стадии становления и пока развита слабо. Согласно АО «СО ЕЭС», на начало 2021 года ее доля в установленной мощности объединенной энергосистемы региона не превышала 0,02%.

Наиболее перспективными районами для строительства ВЭУ являются: Ленинградская область (южное побережье Финского залива, юго-восточное побережье Ладожского озера), Калининградская область (побережье Балтийского моря), Республика Карелия и Архангельская область (побережье Белого моря в районе Онежской и Двинской губ), Мурманская область (побережье Баренцева моря).

Среднегодовые скорости ветра в этих районах изменяются в диапазоне 3,2-4,9 м/с, в Териберке (вблизи Мурманска) – 7,3 м/с. Повторяемость энергоактивных скоростей в среднем составляет 50-60%, в Териберке около 80%. Период в течение года, когда ВЭУ может работать в режиме номинальной мощности, составляет 25-45%, в районе Мурманска – около 58%.

Согласно расчетным оценкам, в ближайшие десятилетия и в середине XXI века рост среднегодовой скорости ветра ожидается в прибрежных северных районах Европейской части до 10-15%, а на Кольском полуострове до 20% (Росгидромет, 2014).

В настоящее время на территории СЗФО в эксплуатации находится одна ветряная электростанция (ВЭС) – Ушаковская (Калининградская область, 6,9 МВт) и небольшие ВЭУ мощностью до 1 МВт на коммерческих объектах. Идет активное проектирование и строительство новых ветропарков и ВЭС. С вводом в эксплуатацию Мурманской ВЭС, мощностью 200 МВт, на территории округа появится самый крупный ветропарк за Полярным кругом.

На территории СЗФО наблюдается большой процент аварий на линиях электропередач из-за неблагоприятных погодных условий. Причем наиболее значимыми климатическими факторами являются ветер, гололедно-изморозевые отложения и грозы.

На всей территории СЗФО наиболее часто отключение электроэнергии происходит из-за явлений, связанных с ветром. Наибольшая повторяемость таких явлений, которые нанесли ущерб, приходится на Мурманскую область. Однако, по данным за 2018 год (Кондратьева и др., 2019), наибольшее число отключений из-за ветра и гололеда произошло в Новгородской области, а наименьшее – на Кольском полуострове, поскольку в Мурманской области осуществляется постоянный мониторинг

фактических метеоусловий. При ухудшении погодных условий принимаются дополнительные меры по предотвращению нарушений электроснабжения.

В северных областях СЗФО в последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению повторяемости гололедных отложений и налипания мокрого снега, что приводит к авариям за счет увеличения нагрузки на провода.

Следует отметить уменьшение числа отключений воздушных линий из-за гололедно-изморозевых отложений в Республике Коми, Псковской и Мурманской областях в связи с использованием новых усовершенствованных систем мониторинга гололедообразования и принятием мер по ликвидации снегоналипания в данных областях.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Происходящие и ожидаемые изменения климата оказывают существенное воздействие на функционирование в регионе коммунальной энергетики, занимающей центральное место в системе ЖКХ. На востоке округа (в Ненецком автономном округе и Республике Коми) уже в настоящее время отмечается наибольшая для территории России скорость уменьшения продолжительности отопительного периода (до 5 сут./10лет). К середине XXI века ожидаемое уменьшение этой величины (по сравнению с концом XX века) составит около 40 дней (рис. 3.1.2.4в) и может способствовать уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий. В наибольшей степени это характерно для западных районов округа. Для извлечения потенциальных выгод необходимо внедрение современных технологий производства энергии и модернизация систем теплоснабжения.

В последние десятилетия на западе округа наблюдается выраженная тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий. Это обусловлено повышением температуры зимнего сезона и ростом числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 3.1.2.4г). К середине XXI века ожидаемое увеличение числа таких дней в Ленинградской, Псковской и Новгородской областях составит, согласно сценарию RCP8.5, 10-12 дней. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и в особенности количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.2.5а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, приведет к проблемам с водоотведением. Уже в настоящее время в Санкт-Петербурге становится актуальной модернизация системы водоотведения на основе использования новых нормативных значений интенсивности осадков. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции, в холодный сезон, будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С и умень-

шение длительности периода с отрицательной температурой воздуха (рис. 3.1.2.4а, б) приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 3.1.2.4д, е).

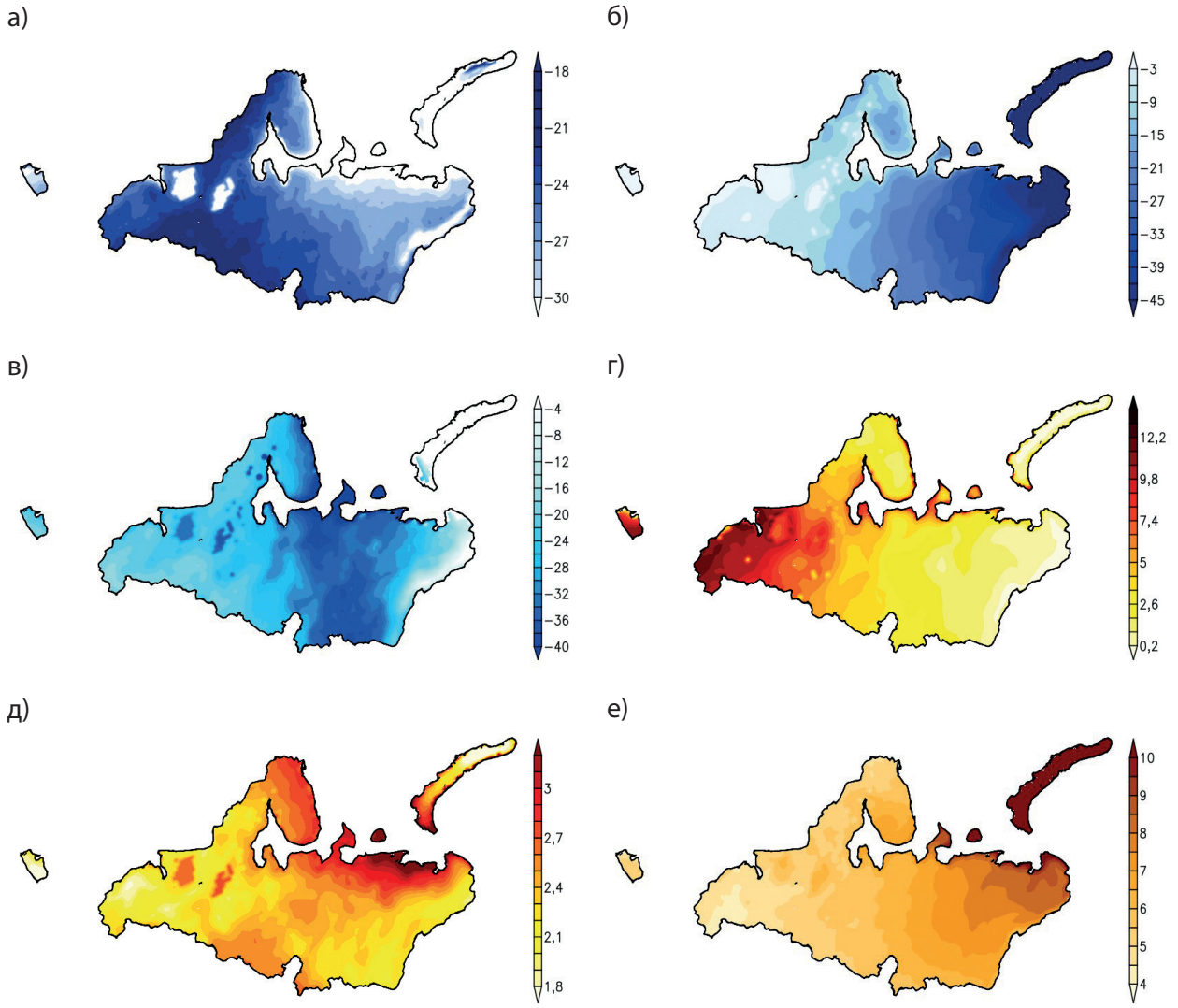



***Рис. 3.1.2.4*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории СЗФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха (дни); б) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (дни); в) продолжительность отопительного периода (дни); г) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); д) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); е) температура наиболее холодной пятидневки (°С). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

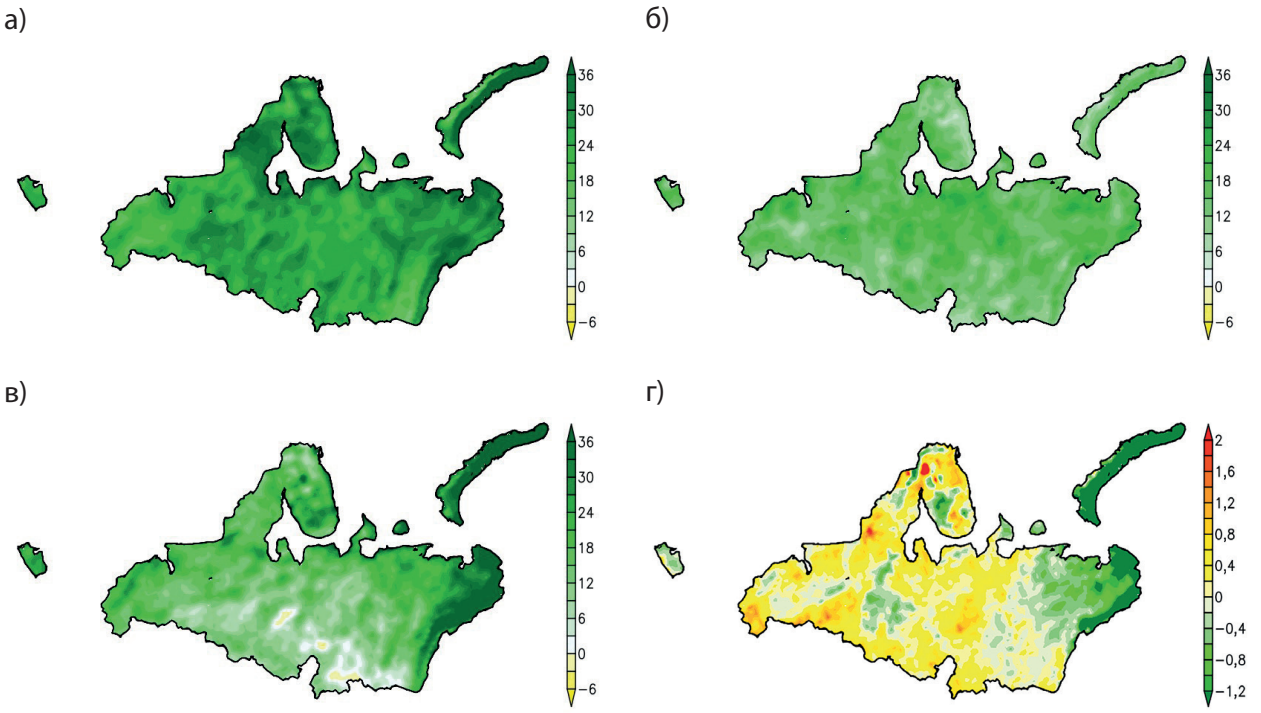



***Рис. 3.1.2.5*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории СЗФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная сумма осадков непрерывного периода с осадками больше 1 мм/сутки для холодного сезона (%); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сутки для теплого сезона (дни). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

***Туризм.*** Территория СЗФО включает пять туристических районов: Кольско-Карельский (Мурманская область и Республика Карелия), Русский Север (Архангельская, Вологодская области и Республика Коми), Ленинградский (Ленинградская область), Западный морской (Калининградская область) и Западный континентальный (Псковская и Новгородская области). Территория обладает обширными рекреационными ресурсами, богатейшим культурным наследием и имеет благоприятные возможности для развития туристической отрасли, а разнообразие природных рекреационных ресурсов позволяет развивать все природоориентированные формы туризма.

Наиболее приоритетными из климатозависимых видов туризма и рекреации в регионах СЗФО являются экологический, активно-спортивный (пешие походы, сплавы по рекам, велопоходы, катание на квадроциклах, снегоходах, лыжах) и лечебно-оздоровительный. В Мурманской области развивается арктический туризм. В зимнее время в ряде регионов значительное внимание уделяется горнолыжному виду рекреации.

В текущем периоде вся территория СЗФО в зимний период находится в зоне теплового дискомфорта. К середине XXI века ожидается, что большая часть территории будет относиться к условно неблагоприятной зоне и только на севере Архангельской области и Ненецкого автономного округа сохранятся условия крайнего дискомфорта. Основной вклад в снижение уровня дискомфортности вносит рост зимних температур.

В летний период практически вся территория СЗФО находится в зоне теплового комфорта и субкомфорта, что позволяет развивать здесь любые виды рекреации. Продолжительность благоприятного периода с 1981 по 2010 гг. составляла от нуля на крайнем севере Архангельской области до почти восьми месяцев в Калининградской, а к середине столетия он увеличится в среднем более чем на месяц на всей территории региона. Однако несмотря на увеличение числа дней с тепловым комфортом (субкомфортом), необходимо учитывать, что на Северо-Западе России наиболее неблагоприятными для рекреационной деятельности являются переходные сезоны: осенью и в предзимье преобладает пасмурная погода с дождем и снегом, а весной таяние снега сопровождается половодьем и распутицей.

Для активных зимних видов туризма, особенно для горнолыжной рекреации, необходимо наличие снежного покрова с высотой более 20 см. На территории СЗФО благоприятные условия для развития горнолыжной индустрии в настоящее время складываются на территориях Мурманской, Вологодской, юга Архангельской областей и в Карелии. Горнолыжные курорты Ленинградской области, расположенные на высотах до 200 м, уже сейчас испытывают влияние изменения климата. Основной негативный вклад вносит состояние снежного покрова: уменьшение числа дней с высотой снега 20 см и более, увеличение частоты и интенсивности жидких осадков зимой. В более южных областях развитие данного вида рекреации сдерживает отсутствие необходимой высоты снежного покрова, в более северных – суровые термические условия. К середине столетия наиболее благоприятные условия прогнозируются для Мурманской области, единственного региона СЗФО с положительной динамикой роста высоты снежного покрова.

В двух прибалтийских регионах СЗФО природные ресурсы позволяют развитие пляжного туризма (Ленинградская и Калининградская области). Купальный сезон здесь короткий, около одного-двух месяцев, и к середине столетия увеличится незначительно – на 15 и 20 дней соответственно. В то же время, в этих регионах, в связи с повышением температуры воздуха (рис. 3.1.2.3б), могут сложиться дополнительные возможности для активных водных видов туризма.

Климатическими рисками для пляжного сезона в этом регионе служит, согласно прогнозу (Росгидромет, 2014), развитие гипоксийно-аноксийных условий в Финском заливе Балтийского моря, в значительной степени связанных с повышением температуры воды.

***Направления адаптации.*** В качестве мер по адаптации экосистем целесообразно снижение и снятие антропогенной нагрузки, в том числе через создание и расширение существующих особо охраняемых природных территорий для формирования экологических коридоров и климатических убежищ. Необходимо усиление профилактики пожаров, контроль численности насекомых-вредителей и своевременная борьба с ними, восстановление водного режима нарушенных торфяников. Поддержание высокой степени залесенности территории важно для снижения риска наводнений и ущерба от них, а также как мера защиты от водной эрозии.

В сфере управления водными ресурсами целесообразными представляются мероприятия по защите населения и объектов экономики от негативного воздействия вод, особенно в бассейне Северной Двины, а также развитие региональных систем гидрологического и гидрохими-

ческого мониторинга в регионах с повышенной антропогенной нагрузкой на водные объекты (г. Санкт-Петербург, Ленинградская область).

В сельском хозяйстве увеличение доз органических удобрений для улучшения питания растений и воспроизводства плодородия почв будет способствовать увеличению урожайности сельскохозяйственных культур.

Адаптационные мероприятия в горнодобывающей отрасли также должны включать создание инфраструктурных объектов по защите водных ресурсов, уменьшению береговой эрозии, снижению рисков наводнений и подтоплений карьеров и шахт.

Адаптационные мероприятия для транспорта включают регулярное проведение профилактических мер с целью предотвращения зимней скользкости на дорожном покрытии, развитие системы погодного мониторинга и оценки состояния дорожного покрытия для целенаправленного выбора стратегий работ при зимнем содержании дорог и превентивным мероприятиям при угрозе образования скользкости на покрытии.

Для адаптации энергетического сектора необходимо совершенствование конструкций ТЭС и АЭС с учетом наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений специализированных климатических характеристик с целью снижения рисков аварий и повышения эффективности генерации энергии, внедрение возобновляемых источников энергии, прежде всего биоэнергетических и ветровых. Для повышения надежности ЛЭП целесообразно использование усовершенствованных систем мониторинга гололедообразования и принятие мер по ликвидации снегоналипания.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства необходима комплексная модернизация систем теплоснабжения и тепловых сетей, обеспечивающая возможность качественного регулирования параметров теплоносителя в зависимости от метеорологических условий. В условиях роста экстремальности осадков актуальна также модернизация системы водоотведения на основе использования новых нормативных значений интенсивности осадков. Для уменьшения ущерба, связанного с высокими геокриологическими рисками на северо-востоке СЗФО, необходимо изменение норм строительного проектирования с учетом ослабления несущей способности многолетнемерзлых грунтов, а также применение инженерных мер адаптации существующей инфраструктуры. В западных районах СЗФО для уменьшения влияния температурно-влажностных деформаций на ускоренное старение зданий важно обеспечить использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания и повышенную коррозийную устойчивость различных элементов, а также конструктивные решения, исключающие повышение влагосодержания строительных конструкций за счет атмосферных воздействий. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

Для адаптации в сфере туризма и рекреации целесообразны развитие горнолыжных курортов в Мурманской области и в Карелии, диверсифи-

кация туристских продуктов зимней рекреации на территории Ленинградской области, разработка правил поведения для сектора арктического туризма и обеспечение контроля за их соблюдением для защиты хрупких экосистем Арктического бассейна.

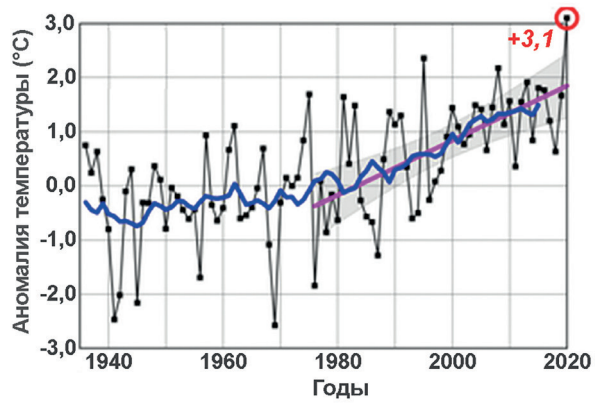
## 3.1.3 Приволжский федеральный округ (ПФО)

### 3.1.3.1 Изменения климата на территории ПФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ПФО (рис. 3.1.3.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Нижнем Новгороде возросла на 2,5 °С, в Перми и Оренбурге на 2 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года, однако наиболее заметно он был выражен в холодный период. На севере и в центре ПФО наблюдалось существенное увеличение годового количества осадков (рис. 3.1.3.1б). На юге округа количество осадков наоборот снижалось, особенно в теплый период.

В последнее тридцатилетие на территории ПФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными температурами, высокой степенью пожароопасности (рис. 3.1.3.2).

а)




б)

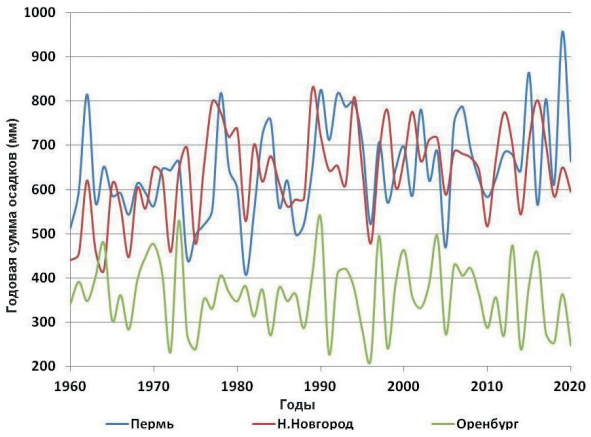



***Рис. 3.1.3.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории ПФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм, Пермь, Нижний Новгород, Оренбург, 1960-2020 гг.*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.3.3) на всей территории ПФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2,5-3,5 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом могут уменьшиться на 5-15%, в наибольшей степени уменьшение осадков затронет юг ПФО. Зимой возможен рост температуры воздуха на 3-5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10-30%.

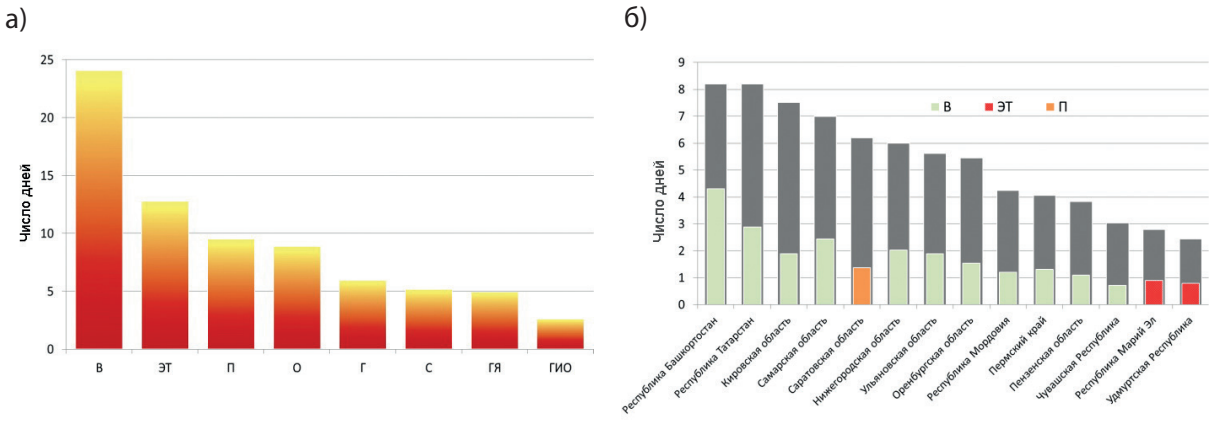



***Рис. 3.1.3.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории ПФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов ПФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data). В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

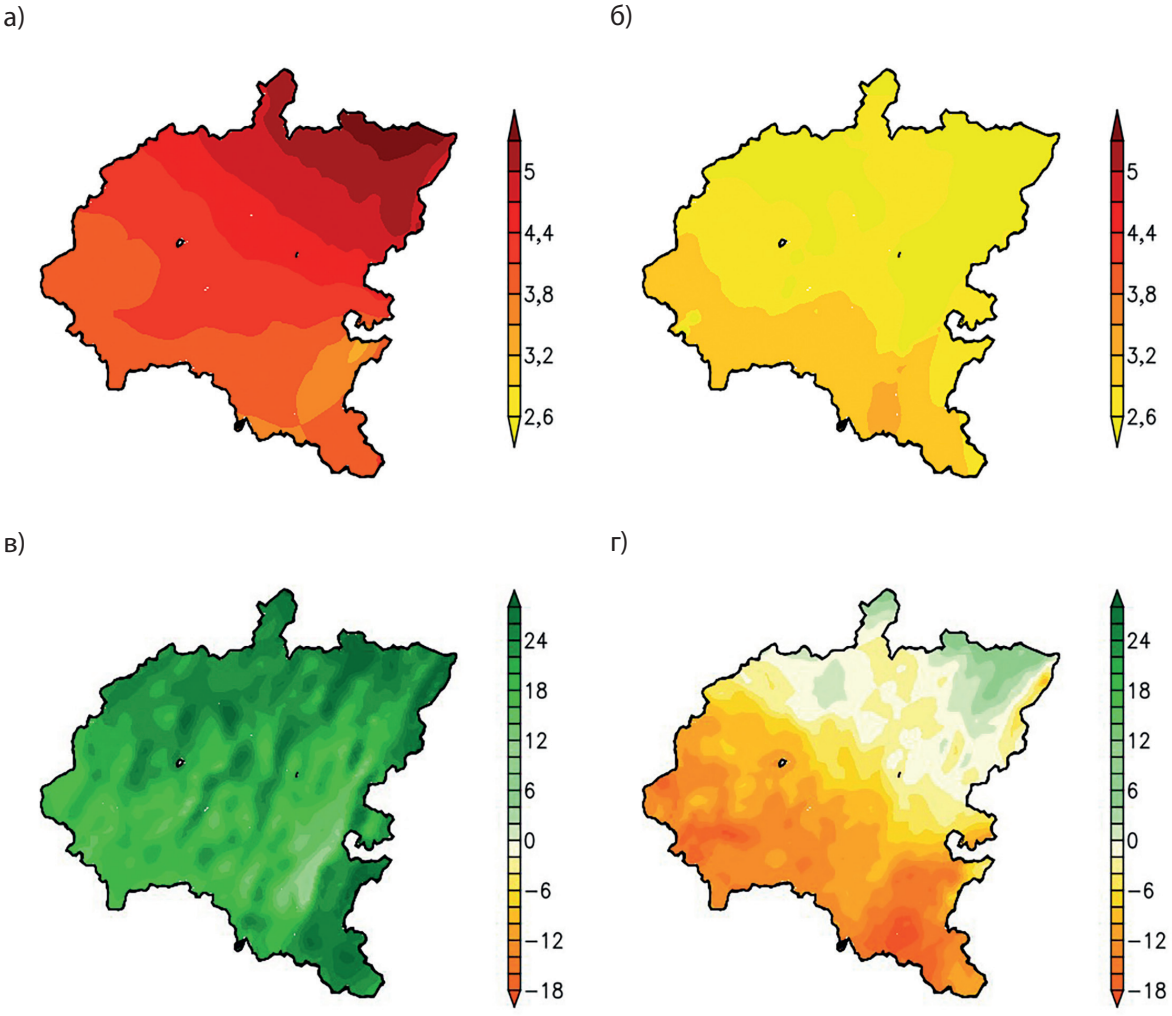



***Рис. 3.1.3.3*** *Изменение средней температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории ПФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.3.2 Природные системы и экономика ПФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** Для ПФО зональное распределение растительности сменяется от южнотаежных елово-пихтовых лесов, иногда с участием кедра сибирского, и широколиственно-хвойных дубово-еловых и широколиственных липово-дубовых лесов до лесостепей и заволжских степей. На востоке расположен западный макросклон Уральских гор с горными кедрово-пихтово-еловыми и елово-пихтовыми лесами в средней части Урала и широколиственными липово-дубовыми лесами Южного Урала.

Для ПФО сдвиг природных зон будет менее значимым (Жильцова, Анисимов, 2015), т.к. повышение температуры сопровождается увеличением количества осадков. На западном макросклоне пояса смешанных лесов и южной тайги поднимутся выше. Возможно сокращение гольцово-тундрового пояса.

За период 2006-2016 гг. отмечено появление новых популяций редких видов растений, причем в качестве одной из причин указывается изменение климата (Vargot et al., 2016). Межгодовые изменения численности птиц в последнее десятилетие некоторые исследователи связывают с температурой воздуха июня (Носкова, 2016; Соловьев, Шихова, 2020). Ряд видов птиц расширяет свои ареалы на север и северо-восток, хотя не всегда изменения климата являются определяющим фактором. Изменение и трансформация местообитаний может вносить более существенный вклад (Glushenkov, 2017). Впервые в средних широтах европейского востока в пределах населенных пунктов стали формироваться оседлые популяции кряквы (Соловьев, Шихова, 2020). Опустынивание или остепнение территории оказывает влияние на численность и ареалы млекопитающих, например, сусликов (малого, крапчатого и рыжеватого), позднего кожана, нетопыря Куля, шакала и на внутривековое расселение к югу сони-полчка. В то же время с севера, из лесной зоны, происходит перемещение на юг рыси, полевки-экономки, рыжей полевки (Шляхтин и др., 2014).

Изменение фенологических дат подтверждается многочисленными данными наблюдений. Переход суточной температуры через 3 °С в сторону повышения происходит раньше, сдвигается распускание листвы и зацветание раннецветущих растений, начало фазы сокодвижения у березы сдвинулось на три дня. Также имеет тенденцию смещения сроков к более ранним на 12-18 дней за период 1983-2016 гг. массовое созревание плодов ягодных кустарничков в горных тундрах. Одновременно отмечаются виды, у которых заметных сдвигов фенологических дат не наблюдалось (Прокошева, 2017; Соловьев, Шихова, 2020), как, например, для березы бородавчатой, черемухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной (Минин и др., 2018). Обнаруживается достоверная зависимость наступления массового окрашивания листвы и конца листопада от суммы температур выше 5 °С. Начало массового пожелтения в определенной степени (30%) зависит от суммы осадков в летний сезон. Экстремальное количество осадков может ускорить окрашивание (Прокошева, 2018).

Уязвимость экосистем ПФО к изменению климата связана в первую очередь с лесными пожарами, засухами и летними ветровыми событиями, в меньшей степени – с биогенными факторами. Ожидается дальнейшее усиление ветрового воздействия, умеренный рост воз-

действия пожаров, биогенных факторов. Будет расти деградация сохранившихся болот лесов и лесостепи, усиливающаяся осушением и перевыпасом. Растет вероятность торфяных пожаров, особенно в случае заброшенных осушенных торфяников (см. главу 2.1.1). Согласно (Фролова и др., 2020), характерны усиление аридизации и снижение речного стока для биомов среднедонских и заволжско-приуральских разнотравно-дерновиннозлаковых степей.

***Баланс почвенного углерода.*** Запас углерода на землях, покрытых лесом, на территории ПФО в слое почвы 0,0-0,30 м составил 2,51±0,48 Гт С (Замолодчиков и др., 2018). В зависимости от сезона запасы общего углерода в пахотных подзолистых почвах на территории Кировской области варьируют в пределах 31,45-45,58 т/га в пахотном горизонте (0,0-0,20 м) (Шихова, Лисицын, 2014).

Третья часть почвенного покрова на территории ПФО занята черноземами и лугово-черноземными почвами. Удельное дыхание почв в регионе находится в пределах от 3-4 т $C\text{-}CO_2$ /га за вегетационный период (Национальный атлас, 2011).

В целом углеродный баланс почв ПФО положительный, значение величины стока углерода находится в пределах 0,64-0,85 т С/га/год. Балансовая оценка углерода на покрытых лесом землях в сумме составила 24,88 ± 5,41 млн т С/год, из них в слое почвы 0,0-0,3 м – 1,52± 0,68 млн т С (Замолодчиков и др., 2018).

К одним из наиболее частых явлений, происходящих на территории ПФО в результате изменения климата, относится засуха. Наиболее жесткие события на территории региона были отмечены в 2010 и 2012 гг. (Национальный доклад, 2019; Павлова, Караченкова, 2020). Результатом засушливых климатических условий является деградация и опустынивание земель. К одной из основных причин деградации почв и, как следствие, изменения баланса углерода почв, относится эрозия (Маштаков и др., 2018). Еще одним последствием процессов аридизации на территории ПФО является уплотнение пахотных горизонтов почв, что приводит к снижению плодородия сельскохозяйственных земель в регионе (Сорокин, Куст, 2018).

***Водные ресурсы.*** Основные реки ПФО – Волга, Кама, Белая, Урал зарегулированы водохранилищами. Во внутригодовом распределении стока рек с естественным водным режимом в последние десятилетия произошли изменения, характеризующиеся, прежде всего, увеличением зимнего и летне-осеннего стока. Наиболее значительный его рост, соответственно, на 100-150% и 50-100% наблюдается на реках южной и юго-западной части округа (Георгиевский и др., 2018). Здесь же отмечается и существенное, на 40-60%, снижение стока в весенние месяцы. Напротив, в восточной части ПФО на реках, сток которых формируется на склонах Уральских гор, а также на севере территории, весенний сток в последние десятилетия увеличился. Здесь же, возрастает повторяемость опасных максимальных расходов воды весеннего половодья, что повышает риски наводнений (Георгиевский и др., 2019). Вместе с тем, на всей территории ПФО уменьшилась опасность формирования низких расходов воды редкой повторяемости в меженные периоды.

***Сельское хозяйство.*** Поволжье – самая засушливая территория земледельческой зоны России, зона рискованного земледелия, на которую приходится около 22% валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом.

За последние десятилетия повсеместно наблюдается рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур как в теплый период года, так в период перезимовки сельскохозяйственных культур. Рост зимних температур, в том числе в январе, критическом для зимующих культур, достигает 1,0-1,2 °С за десятилетие, что свидетельствует об улучшении условий перезимовки озимой пшеницы, которая дает примерно половину валового сбора зерновых и зернобобовых в этом регионе.

Наблюдается положительная тенденция к росту весенних осадков за последние десятилетия, которая оценивается величиной 7-10% за 10 лет. В самых засушливых областях, Оренбургской и Саратовской, в летние месяцы вегетационного периода количество осадков уменьшается, а скорость снижения составляет от –15% до –10% за десятилетие. На севере округа (Пермский край, Кировская область) значимых отклонений показателей влагообеспеченности относительно базового периода не наблюдается.

Увеличивается продолжительность периодов без осадков и повторяемость атмосферных засух на территории округа. За последнее десятилетие (2009-2018 гг.) в отдельных районах Саратовской области опасное явление «Засуха атмосферная» выявлено в восьми годах из десяти – засух не было только в 2012 и 2013 гг. В засушливые годы в 50% случаев в течение вегетационного периода наблюдались две–три засухи. Так, в 2010 г. засуха продолжалась в общей сложности 76 дней с 30 мая по 18 августа. В 2014 г. наблюдалась весенняя засуха с мая до середины июня, а второй длительный период с засухой продолжался полтора месяца – с июля по август. При этом нет четко выраженной аномалии периода засух.

Жаркая засушливая погода, благоприятные экологические условия, будут способствовать размножению саранчовых вредителей. Наиболее вредоносны в этом регионе будут такие стадные виды как азиатская саранча *(Locusts migratoria migratoria* L.*)* и итальянский прус *(Calliptamus italicus* L.*)*. Усилится роль и других теплолюбивых насекомых-вредителей: колорадского жука, проволочников (личинок жуков-щелкунов), жужелиц, клопа вредная черепашка. Необходимы постоянный мониторинг, своевременное проведение агротехнических мероприятий, обработки инсектицидами, использование устойчивых сортов культурных растений.

***Добывающая промышленность.*** Минерально-сырьевая база ПФО играет ключевую роль в экономике региона. На территории округа добывается более 20% российской нефти. Ведется добыча природного газа в Оренбургской области, калийных солей, фосфоритов, цинка, меди, серебра, золота в предгорьях Урала.

Наибольшее влияние на добывающую промышленность ПФО оказывают увеличение температуры воздуха и некоторое уменьшение осадков в теплый период года, особенно на юге ПФО. Эти факторы приводят к росту пожароопасности в этом районе округа, что обуславливает значительные риски для добычи нефти и газа. Более теплая погода провоцирует и риски уменьшения добычи газа, т.к. рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива (см. главу 2.3.1).

Наблюдаемая тенденция увеличения месячных и суточных сумм осадков на северо-востоке ПФО, в предгорьях Урала может создавать угро-

зу для добычи полезных ископаемых в шахтах и карьерах, вызывая оползни, осыпи, обрушения по бортам действующих и отработанных карьеров, а также провоцируя риски затопления шахт.

По результатам климатического моделирования, к середине XXI века ожидается усиление наблюдаемых тенденций изменения температурно-влажностного режима на территории округа (рис. 3.1.3.3б, г, 3.1.3.4г, 3.1.35б, г).

***Транспорт.*** Транспортная сеть ПФО представлена железнодорожным, автомобильным, речным и авиационным видами транспорта. По его территории проходят автомобильные и железные дороги, связывающие ЦФО и СЗФО с УФО, СФО, ДФО, а также с Республикой Казахстан. В ПФО расположено 20 аэропортов. Основными речными транспортными магистралями являются реки Волга, Кама, Белая. По территории проходит ряд крупных нефте- и газопроводов российского и международного значения.

Изменения климата, оказывающие воздействие на работу транспортной инфраструктуры в этом регионе, будут проявляться, прежде всего, в виде ожидаемого роста опасных метеорологических явлений, таких как сильный ветер, град, грозы и т.д.

Изменения температурно-влажностного режима теплого периода будут наиболее заметно влиять на функционирование наземного транспорта на юге региона, где ожидается рост температур в среднем на 2-3 °С. В Оренбургской и Саратовской областях, где температура воздуха превышает 30 °С в течение около 25-28 дней, а на границе с Казахстаном до 45-50 дней, работа наземного транспорта будет еще более осложнена: увеличится число дней с ограничением движения для большегрузов по дорогам федерального значения (особенно на трассах М-5 «Урал» и А-305 «Оренбург – Илек –Республика Казахстан»), возможен сбой в расписании движения поездов на Куйбышевской железной дороге (рис. 3.1.3.4г).

Функционирование водного транспорта в настоящее время затруднено в связи с маловодностью рек Волжско-Камского бассейна. Рост температуры воздуха на фоне уменьшения осадков теплого периода (Хлебникова и др., 2019а) на большей части округа уменьшит летний сток. Снижение водности рек усилит аккумулятивные процессы в них и вызовет их дополнительное обмеление. Все эти процессы будут оказывать негативное влияние на судоходство. Начиная с 2003 г. идет снижение минимального (летне-осеннего) стока и в Башкирии. В первую очередь это объясняется уменьшением количества осадков в летний период (засухи 2010 г., 2012 г.) и увеличением глубины залегания грунтовых вод – основными источниками питания рек в период летне-осенней межени (Галиуллина, 2018).

Наиболее благоприятный прогноз на севере округа – увеличение количества зимних осадков, подъем температуры холодного периода, поздний ледостав приведут к росту зимнего стока и увеличению водности реки Кама.

***Производство и передача энергии.*** Электроэнергетика ПФО представлена всеми видами электростанций: тепловыми, гидравлическими, атомными. На ТЭС вырабатывается 59% электроэнергии ПФО, на ГЭС – 25%, на АЭС – 15%. Наиболее крупными электростанциями являются Заинская (республика Татарстан) и Ириклинская ГРЭС (Оренбургская область), а также Балаковская (Саратовская область) и Димитровградская АЭС (Ульяновская область). Наблюдаемый рост максимальных температур воздуха

и повторяемости жарких дней создает угрозу для эффективного охлаждения энергоблоков АЭС и ТЭС из-за роста температуры охлаждающей воды (см. главу 2.3.5), а, следовательно, ведет к падению КПД и к ухудшению функционирования технических систем защиты энергооборудования. Увеличивающееся испарение с поверхности водоемов-охладителей в ряде случаев может привести к нехватке воды нужной температуры. Кроме того, в более теплой воде активно размножаются моллюски и водоросли, которые оказывают негативное воздействие на работу систем технического водоснабжения АЭС.

По данным сценарного прогнозирования характеристик термического режима, к середине XXI века на территории ПФО ожидается дальнейший рост летних экстремумов, который составит около 3 °С по сравнению с 1990-1999 гг. (Хлебникова и др., 2019а). В южной части округа также ожидаются уменьшение сумм осадков в летний период на 10-15% и увеличение средней непрерывной продолжительности засушливых периодов примерно на пять дней (Хлебникова и др., 2019б), что может обусловить дополнительные риски для систем охлаждения энергоблоков (рис. 3.1.3.3б, г, 3.1.3.4д, 3.1.3.5 г).

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости детального учета наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических параметров при проектировании новых АЭС и ТЭС и модернизации уже существующих энергетических объектов с целью повышения надежности и эффективности их функционирования в ближней и дальней перспективе.

ПФО является крупнейшим промышленным регионом Российской Федерации и одним из лидеров по реализации программы по развитию возобновляемой энергетики. Валовые ресурсы возобновляемых источников энергии в целом по округу характеризуются следующим образом: солнечные ресурсы 140,8 млрд т.у.т., ветровые 32,1 млрд т.у.т., ресурсы биомассы 31,8 млн т.у.т., малая гидроэнергетика 11,9 млн т.у.т., запасы торфа 413,8 млн т.у.т. (Минэнерго России, 2012).

Наибольшими солнечными ресурсами обладают южные и юго-восточные районы округа. В Оренбургской, Саратовской, Самарской областях годовая продолжительность солнечного сияния более 2000 часов, число солнечных дней за год 280-290, количество солнечной радиации, поступающей на земную поверхность за год на квадратный метр около 1200 кВт•ч.

В Оренбургской области действует десять солнечных электростанций (СЭС). Две из них являются одними из крупных в России (Сорочинская, с установленной мощностью 60 МВт и Новосергиевская мощностью 45 МВт). Строится и проектируется еще несколько СЭС. В случае их реализации Оренбургская область станет одним из крупнейших производителей солнечной энергии в России. Еще одним крупным регионом, активно внедряющим солнечные станции, является Башкортостан, где введены в действие шесть СЭС и одна строится. Солнечные электростанции введены в Саратовской и Самарской областях. По установленной мощности СЭС ПФО занимает в России второе место (464,5 МВт) после ЮФО.

Солнечные ресурсы Оренбургской области и Башкортостана имеют большой потенциал для получения тепловой энергии. В Оренбургской области удельная выработка тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами составляет 700-750 кВт•ч/м$^2$, в Башкортостане 620-670

кВт•ч/м$^2$, коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения достигает 65%.

Ветровая энергетика – перспективный климатозависимый сектор возобновляемой энергетики в ПФО. Наиболее благоприятные условия для развития ветроэнергетики имеются в центральной части ПФО (побережье Волги), на юго-востоке региона, на побережье Куйбышевского водохранилища. Повторяемость энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с), при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, составляет 60%, а в Мордовии более 80% (Аухадеев, 2016). В ПФО действует четыре ВЭС, самые крупные из которых – Ульяновская (Симбирская) мощностью 50 МВт и Ульяновская ВЭС-2 мощностью 35 МВт. Следует отметить, что Ульяновская область, где сформированы крупные ветропарки, является единственным регионом в ПФО, где альтернативная энергетика имеет долю в производстве электроэнергии более одного процента.

В настоящее время во многих регионах округа, обладающих значительными запасами углеводородного сырья, в частности, в Татарстане, отсутствуют значимые объекты альтернативной энергетики, или имеется только малая гидроэнергетика. Проекты строительства солнечных и ветряных электростанций рассматриваются лишь в перспективе.

Территория ПФО расположена в зоне централизованного энергоснабжения Российской Федерации. На бесперебойную работу сетевой инфраструктуры оказывают влияние различные метеорологические явления.

Согласно районированию (СП, 2016), большая часть территории ПФО (кроме Республики Башкортостан и Предуралья) расположена во II гололедном районе, который характеризуется небольшими гололедными нагрузками. Однако даже небольшие гололедные нагрузки при сильном ветре могут приводить к значительным авариям на ЛЭП. По данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», гололедно-изморозевые отложения, которые нанесли ущерб, отмечаются на территории ПФО не каждый год, однако прослеживается тенденция к увеличению частоты этих явлений и числа дней с гололедом на некоторых метеостанциях региона. В областях ПФО ежегодно наблюдаются ледяные дожди, что способствует образованию больших гололедных нагрузок на провода воздушных линий на обширных территориях.

На всей территории округа отмечаются сильные ветры, наносящие значительный ущерб (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»). Кроме того, для территории ПФО характерно образование смерчей. Наиболее часто они наблюдаются в Нижегородской, Пензенской областях, Республике Башкортостан и Чувашской Республике. Все упомянутые явления создают риски аварий и отключений на линиях электропередач, которые необходимо предотвращать. Установление постов контроля за метеорологическими нагрузками (ветровыми и гололедными) позволит своевременно реагировать на угрозу возникновения аварий.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Центральное место в системе ЖКХ занимает коммунальная энергетика, обеспечивающая функционирование систем теплоснабжения и электроснабжения во все сезоны года. К середине XXI века величина градусо-суток отопительного периода, являющаяся индексом теплопотребления, уменьшится в регионе на 1000-1600 °С•сут. (в наибольшей степени – на северо-востоке округа, в Пермском

крае) (рис. 3.1.3.4е). Такие изменения могут привести к потенциальному уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года более чем на 15% по отношению к базовым значениям конца XX века. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий и препятствующими энергосбережению. При отсутствии модернизации сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов.

В летний сезон ожидается значимое увеличение числа жарких дней (рис. 3.1.3.4г) и такого показателя как дефицит холода (рис. 3.1.3.4в), являющегося индексом энергопотребления в летний сезон и свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. Наибольшее увеличение дефицита холода ожидается в Саратовской области (300 °С•сут и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, наиболее выраженной на юго-западе округа – в Саратовской и Оренбургской областях (рис. 3.1.3.4б). Эта тенденция приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение количества зимних осадков, в особенности, выпадающих в период оттепелей.

Изменение режима атмосферных осадков на территории округа негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.3.5а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на работу городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. Рост экстремальности осадков будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.3.5в, г), что может привести к проблемам с водообеспечением.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха (в наибольшей степени – на северо-востоке округа, в Пермском крае) приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ (рис. 3.1.3.4а). Однако рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур (рис. 3.1.3.4д).

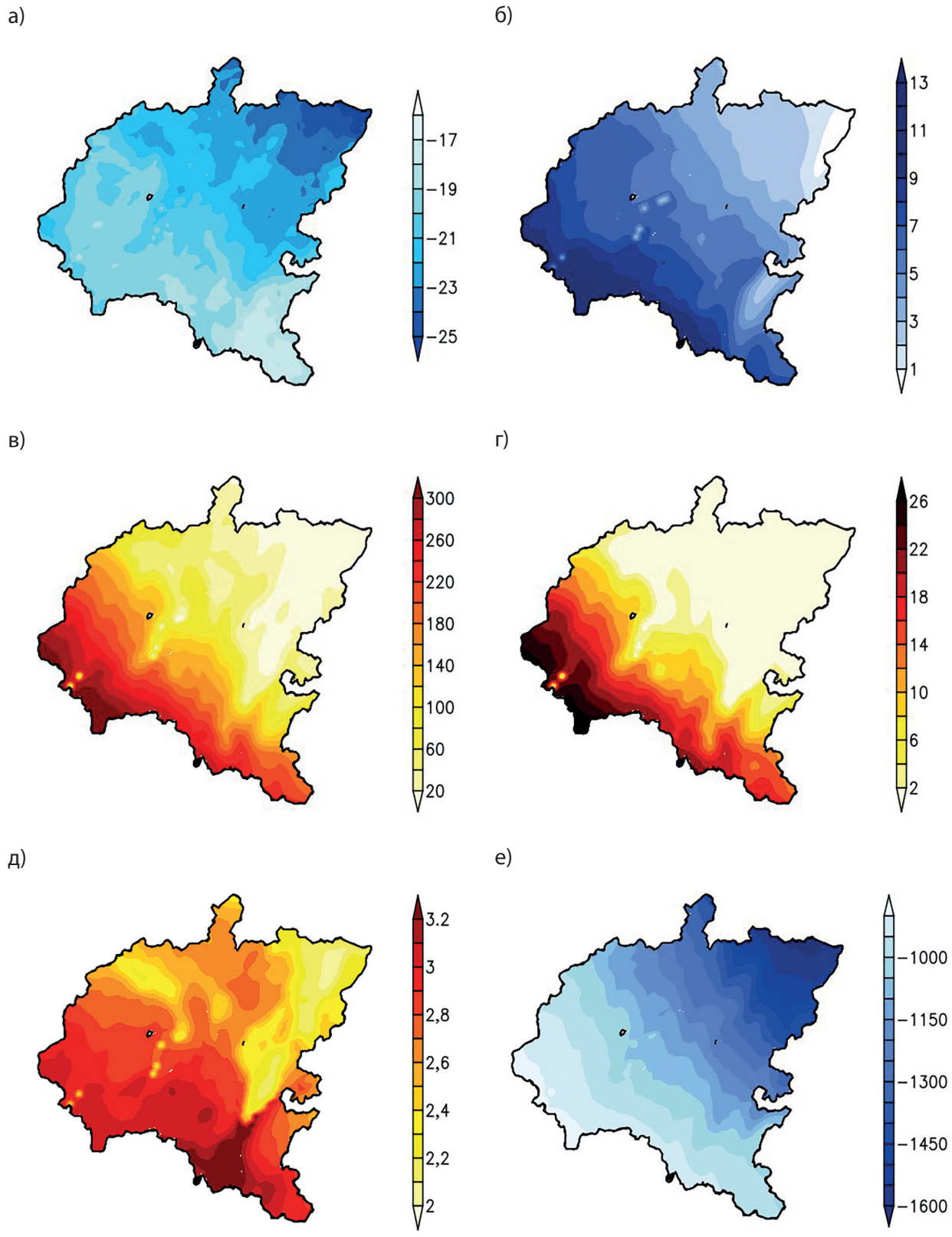



***Рис. 3.1.3.4*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории ПФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха (дни); б) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); в) дефицит холода (°С•сут.); г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С (дни); д) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); е) градусо-сутки отопительного периода (°С•сут.). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

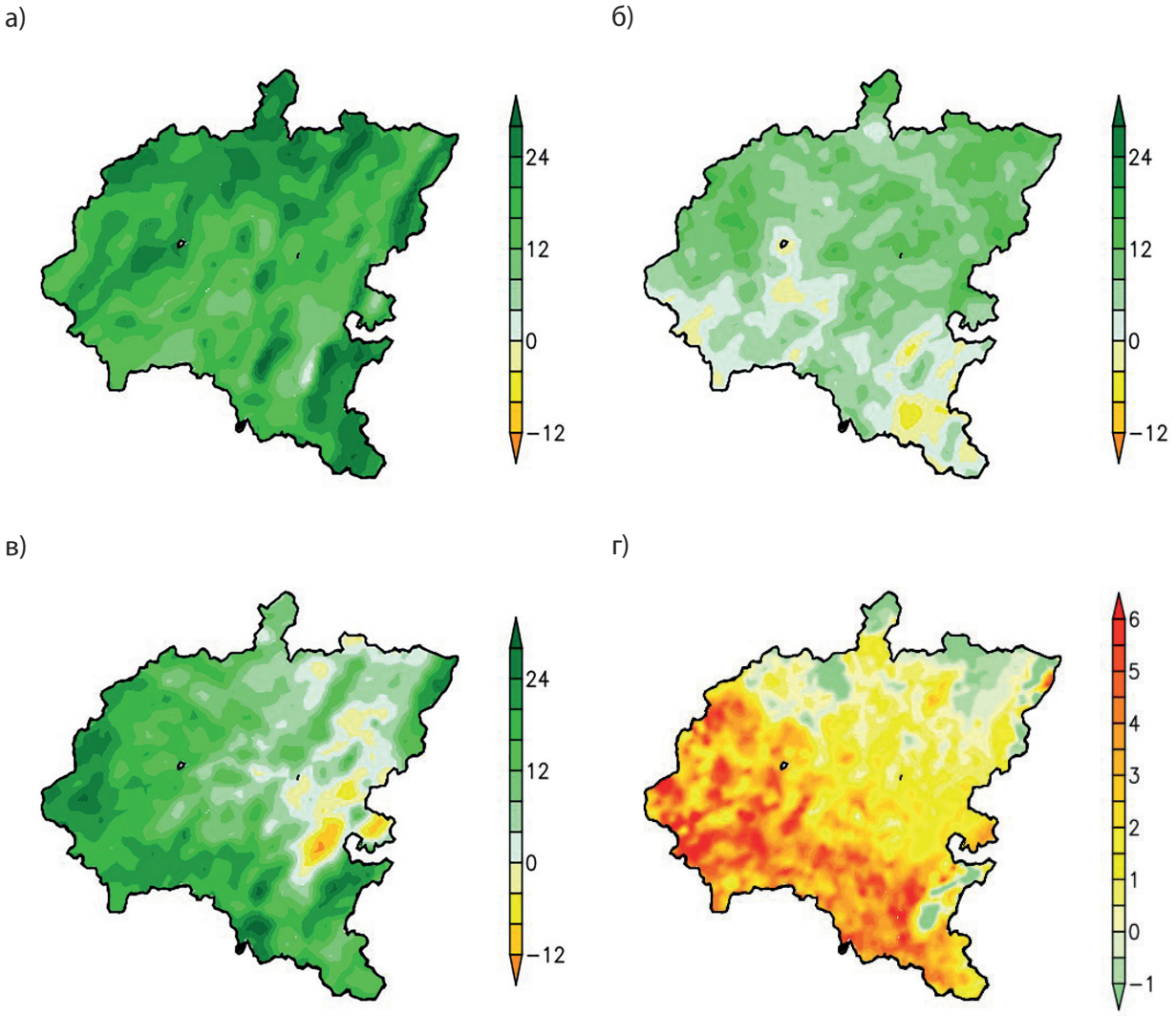



***Рис. 3.1.3.5*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории ПФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная сумма осадков непрерывного периода с осадками больше 1 мм/сутки для холодного сезона (%); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сутки для теплого сезона (дни). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

***Туризм.*** Территория ПФО включает четыре туристических района: Верхневолжский (Нижегородская, Кировская области и Республики Чувашия и Марий Эл), Уральский (Пермская, Свердловская, Челябинская, Оренбургская области и Республики Башкирия и Удмуртия), Южно-Российский (Республика Мордовия) и Северное Поволжье (Самарская, Саратовская области и Республика Татарстан) (Гировка, 2015). Во всех субъектах ПФО в большей или меньшей степени уделяют внимание вопросам развития туристской отрасли в регионе, но лидерами являются Республики Татарстан и Башкортостан и Нижегородская область.

Ключевым для округа является круизный туризм, в частности, речные круизы по Волжскому водному пути. Второе важное направление – развитие туризма и рекреации на базе природного потенциала Уральских гор (Республики Башкортостан и Удмуртия и Пермский край). Здесь функционируют комплексы зим-

них (в первую очередь, горнолыжного спорта) и летних видов активного отдыха (экстремального сплава по горным рекам, конного спорта и туризма, ловли хариуса и форели, спелеотуризма и др.). Важнейшим перспективным направлением здесь является экологический туризм, так как округ располагает необходимыми природными ресурсами для его развития (14 государственных, заповедников, 10 национальных парков и три заказника федерального значения). Большой потенциал для развития в регионах ПФО имеет сельский туризм, активное развитие которого наблюдается в Кировской, Нижегородской и Оренбургской областях (Барашов, Домов, 2020). Регионы ПФО обладают достаточными возможностями для развития санаторно-курортного туризма. Лечебно-оздоровительный отдых базируется здесь на наличии уникальных природных месторождений грязей и минеральных вод. Кратковременная внутренняя рекреация представлена разнообразными походами: пешими, автомобильными, водными, лыжными. Популярны теплоходные путешествия по рекам Вятка, Усьва, Кама. Основные районы самодеятельного туризма – Северный и Средний Урал.

Комфортный для летних типов рекреации период начинается с середины мая в южных районах и с середины июня – в северных, а заканчивается в середине сентября и августа соответственно, составляя от двух месяцев в Кировской области до четырех в Саратовской. Но, на юге и юго-востоке Саратовской области такая продолжительность комфорта условна – здесь в летний период отмечается жаркий дискомфорт, продолжающийся в среднем до 50 дней.

Оценка степени комфортности погодных условий на территории ПФО (Оборин и др., 2014) для целей лечебно-оздоровительного туризма по четырем типам погоды (весьма благоприятному, благоприятному, неблагоприятному и особо неблагоприятному) показала, что в целом за год на территории ПФО преобладает неблагоприятный тип погоды, который охватывает центральную и северо-восточную часть ПФО. В юго-западной части территории климат более «благоприятный», а самая комфортная погода с точки зрения влияния на условия рекреации наиболее часто отмечается на северо-западе территории ПФО. Лучшее время для лечебной рекреации – осенне-зимний период. Лето относится к дискомфортному сезону, повторяемость особо неблагоприятной погоды в этот сезон почти в 1,5 раза больше, чем в другие сезоны, а повторяемость весьма благоприятной погоды достигает минимального значения.

Ожидаемый рост температуры воздуха к середине XXI века в южных областях региона негативно скажется на летней рекреации, вызвав, при условии сохранения современной тенденции, значительное увеличение числа дней с сухим дискомфортом.

Оценка ресурсов зимней рекреации показывает, что во всех областях возможно комфортное для этого времени года пребывание на открытом воздухе для занятий зимними видами отдыха (рис. 3.1.3.3а). В Кировской и Нижегородской областях, в Республике Татарстан и в Пермском крае с точки зрения теплового комфорта – с ограничениями от 25 до 30 дней. Прогнозируемое повышение зимних температур сократит число таких дней.

***Направления адаптации.*** Возможные направления адаптации видов и экосистем и использования экосистемных услуг в ПФО аналогичны предложенным для ЦФО. Основными адаптационными мерами по снижению воздействия кли-

матических явлений на процессы деградации почв являются введение систем прогнозирования засухи и посадка защитных лесных полос.

Управление водными ресурсами ключевой водохозяйственной системы ПФО – Волжско-Камского каскада водохранилищ, целесообразно осуществлять интегрированно, с учетом произошедших и ожидаемых изменений в составляющих водного и водохозяйственного балансов отдельных водохранилищ каскада.

В сельском хозяйстве ПФО в качестве адаптационных мер целесообразно более широкое внедрение влагосберегающих технологий (снегозадержание, уменьшение непродуктивного испарения, ультраранние сроки сева и др.), расширение посевов засухоустойчивых культур, расширение посевов озимых культур, расширение орошаемых площадей. Необходим постоянный мониторинг саранчовых вредителей, своевременное проведение агротехнических мероприятий, обработки инсектицидами, использование устойчивых сортов культурных растений.

Для безопасной работы транспорта необходимо создание защитных мер по предотвращению образования снежных заносов путем устройства постоянных или временных средств снегозащиты. Разработка мероприятий по повышению пропускной способности инфраструктуры внутренних водных путей Волжско-Камского бассейна и обеспечению глубин, необходимых для судоходства.

Для адаптации энергетической отрасли необходим детальный учет наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических параметров при проектировании новых АЭС и ТЭС и модернизации уже существующих энергетических объектов с целью повышения надежности и эффективности их функционирования в ближней и дальней перспективе, развитие всех видов ВИЭ (солнечных, ветровых, малых ГЭС, биоэнергетики), мониторинг состояния ЛЭП.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства необходима модернизация систем теплоснабжения, обеспечивающая уменьшение энергопотребления в холодный сезон и способствующая повышению уровня комфортности жилых зданий. Для поддержания оптимального микроклимата в помещениях необходимо повышение уровня инженерного обеспечения зданий с учетом роста экстремальных температур и энергопотребления в летний сезон. С целью предотвращения критических ситуаций с водоснабжением в условиях увеличения продолжительности периодов с дефицитом осадков желательно принятие мер, направленных на повышение эффективности водопотребления населением, а также в промышленном производстве и сельском хозяйстве. На юго-западе ПФО (в Саратовской и Оренбургской областях), для уменьшения влияния температурно-влажностных деформаций на ускоренное старение зданий в зимний сезон важно обеспечить использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания и повышенную коррозийную устойчивость различных элементов. В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур.

Для туристской деятельности необходимо формирование и реализация стратегий маркетинга для развития зимних видов рекреации в Кировской и Нижегородской областях, в республике Татарстан и в Пермском крае.

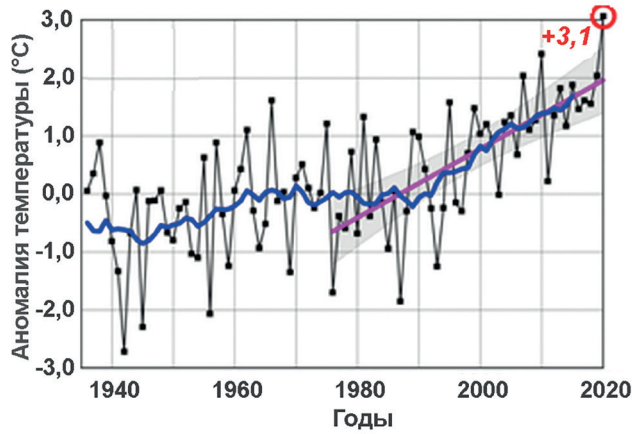
## 3.1.4 Южный федеральный округ (ЮФО)

### 3.1.4.1 Изменения климата на территории ЮФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ЮФО (рис. 3.1.4.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Ростове-на-Дону возросла примерно на 1,5 °С, в Астрахани и Симферополе на 2 °С. Рост температуры наблюдался как в теплый, так и в холодный периоды года. Значимых трендов годовых сумм осадков на территории ЮФО в указанный период не отмечалось (рис. 3.1.4.1б).

В последнее тридцатилетие на территории ЮФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными осадками, наводнениями (рис. 3.1.4.2).

а)




б)

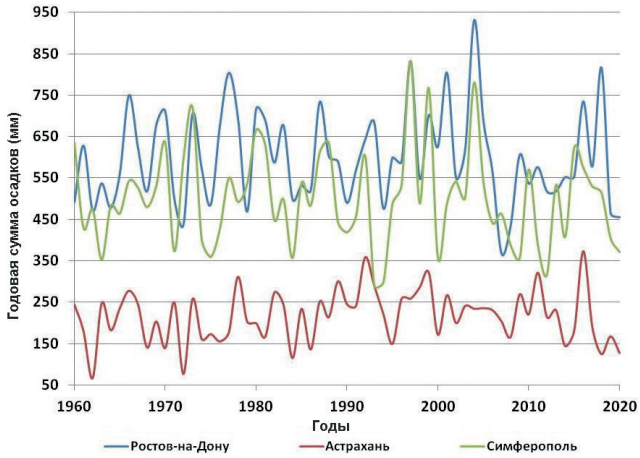



***Рис. 3.1.4.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории ЮФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм, Ростов-на-Дону, Астрахань, Симферополь, 1960-2020 гг.*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.4.3) на всей территории ЮФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2,0-3,5 °С (Школьник и др., 2022). Наибольшее потепление ожидается на востоке округа. Суммы осадков летом на большей части округа, исключая предгорья Кавказа, могут уменьшиться на 5-15%, в горных районах вероятно увеличение сумм осадков на 15-20%. Зимой на территории ЮФО ожидается рост температуры

воздуха на 2-4 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10-30%, однако в Крыму вероятно уменьшение зимних осадков на 3-5%.

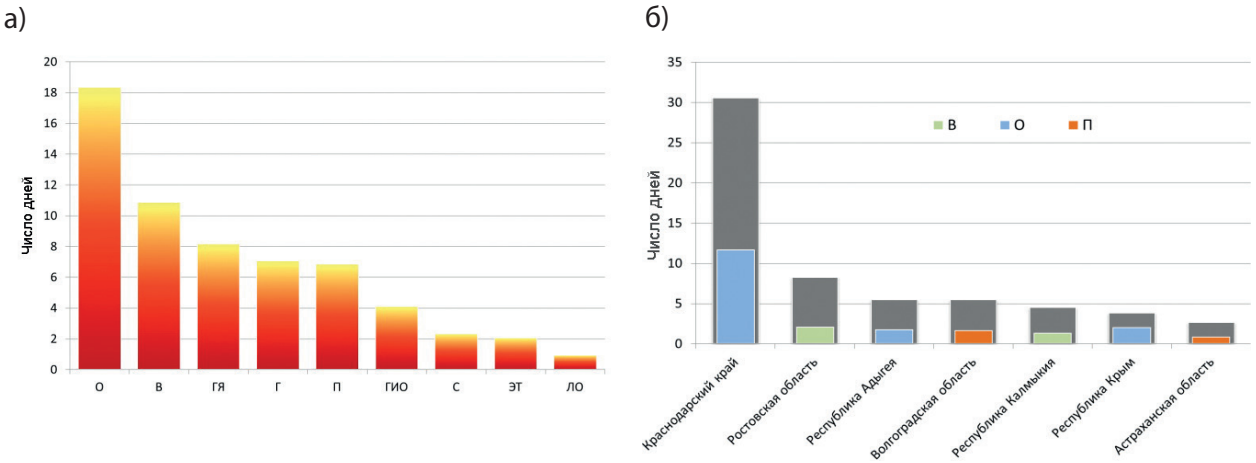



***Рис. 3.1.4.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории ЮФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов ЮФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data). В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

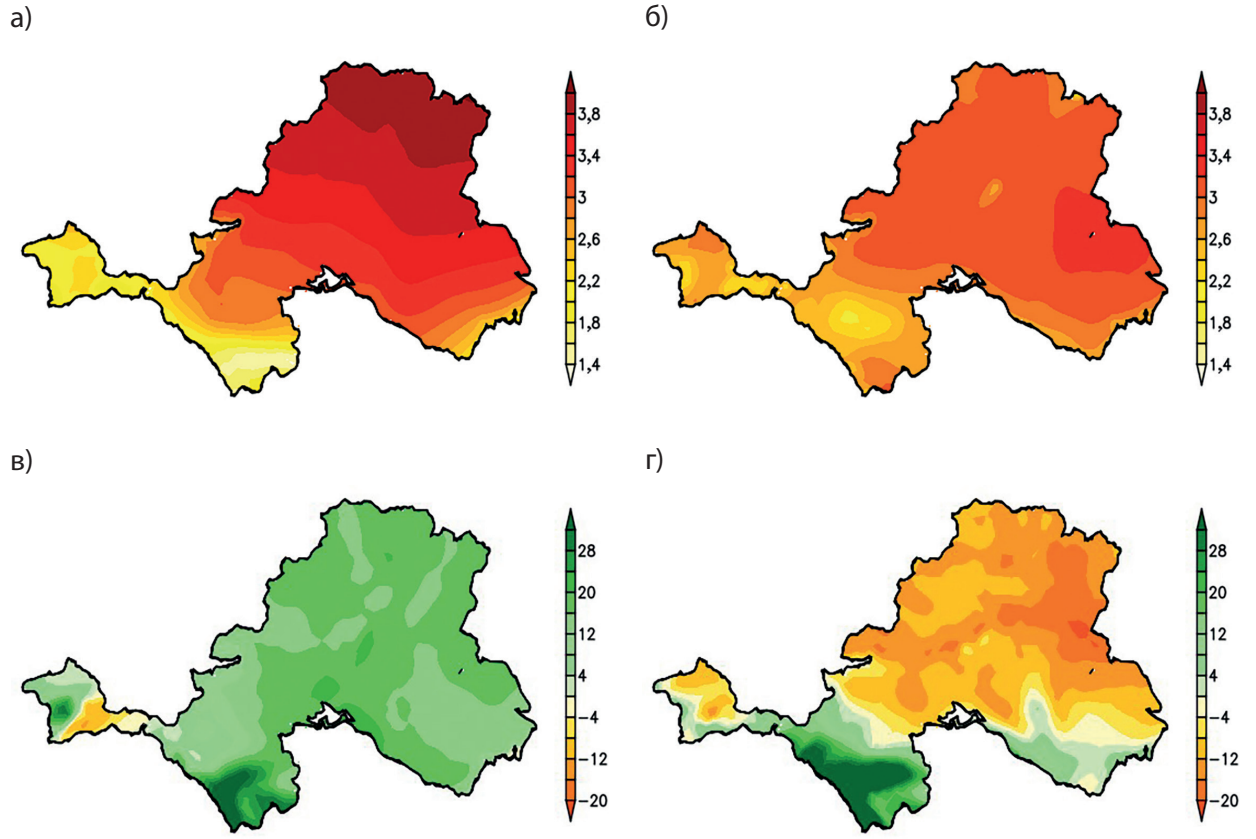



***Рис. 3.1.4.3*** *Изменение средней температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории ЮФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.4.2 Природные системы и экономика ЮФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** ЮФО находится в пределах южной степной и пустынной части Восточно-Европейской равнины, а также включает Западную часть Кавказа. Территория характеризуется высоким уровнем биоразнообразия и эндемизма. На побережье Черного моря субтропические экосистемы Сочинского биома сменяются Крымско-Новороссийскими средиземноморского типа. Выше пояса широколиственных и хвойных лесов сменяются кавказским субальпийским высокотравьем, переходящим в альпийские луга и экосистемы нивального пояса, практически лишенные растительности.

На территории ЮФО прогнозируется расширение зоны пустынь (Жильцова, Анисимов, 2015). Возможно продвижение степной растительности вверх по северным склонам. Средиземноморские биомы могут подняться выше на склонах южной экспозиции, оттеснив умеренные широколиственные леса. Возможно, они соединятся с поясом инверсионной лесостепи на северо-западной оконечности Кавказа. Для остальных поясов растительности ожидается сдвиг вверх по склонам с одновременным сокращением площади (Шестой Национальный, 2020).

Происходит изменение видового разнообразия и ареалов растений и животных. На территории Краснодарского края обнаружены новые виды беспозвоночных, которые быстро расширяют свой ареал на северо-восток (Замотайлов и др., 2019). Отмечается расширение ареала на запад и гнездование в Ростовской области розового пеликана, черноголового хохотуна и чегравы. Пока нет уверенности в долгосрочной устойчивости тренда (Липкович, 2018). Прогнозируется, что ареал малоазиатского тритона может заметно сократиться, т.к. многие пригодные местообитания исчезнут в Краснодарском крае до 2070 г. (Литвинчук, 2017).

Данные об изменении фенологических дат немногочисленны. Вследствие роста температур в зимне-весенние месяцы на восемь – девять суток, сдвинулось пыление можжевельника дельтовидного в Крыму (Корсакова и др., 2020). Сдвигаются на более ранние сроки размножения кудрявого пеликана (Липкович, 2018).

На равнинной части округа иссушение степей и расширение пустынь приведут к сокращению продуктивности экосистем, а также потере накопленного углерода. В горах в нижних поясах засушливой растительности продуктивность будет сокращаться, в остальных – расти, включая активное зарастание субальпийского пояса лесами и сокращение площади нивального пояса (Visconti et al., 2018).

Уязвимость экосистем к изменению климата связана в первую очередь с лесными пожарами и засухами, а также с биогенными факторами. Согласно (Фролова и др., 2020), характерны усиление аридизации и снижение речного стока для биомов среднедонских разнотравно-дерновиннозлаковых степей и доно-волжских дерновиннозлаковых степей, а также прикаспийских пустынно-степных биомов. Ожидается существенный рост данных воздействий. Будет также расти деградация сохранившихся степных болот, усиливающаяся проведенным ранее осушением и текущим перевыпасом. Растет вероятность перехода степных пожаров в торфяные, особенно в случае заброшенных осушенных торфяников. Все большее значение будут приобретать сохранившиеся болота как

убежища влаголюбивых видов флоры и фауны. В горах высока вероятность эрозионных процессов в связи с экстремальными ливнями (см. главу 2.1.1).

Вселение и акклиматизация самшитовой огневки на Северо-Западном Кавказе с 2012 г. привело к потере большей части природных самшитовых рощ – уникальных субтропических экосистем, реликтов третичного периода (Щуров и др., 2015).

Прямые антропогенные воздействия иногда могут приводить к деградации экосистем вопреки благоприятным климатическим трендам. Например, уровень воды в озере Баскунчак, расположенном в зоне биомов южных остепненных пустынь, за период 1991-2018 гг. относительно 1961-1990 гг. снизился, несмотря на увеличение осадков на 5% и уменьшение испарения на 12%. Это объясняется задержанием поступающей с поверхности водосбора воды дамбами на основных притоках водоема (Поздняков и др., 2020). В Калмыкии рост температур накладывается на рост водопотребления, что приводит к обмелению и пересыханию как естественных водоемов, так и водохранилищ (Национальный доклад, 2021).

***Баланс почвенного углерода.*** Почвы ЮФО относятся к наиболее плодородным на территории России. На большей части территории распространены черноземы, в горах – серые лесные почвы, а на Черноморском побережье Кавказа – желтоземы (Национальный атлас почв, 2011; Довгополая, Широких, 2015). Содержание гумуса в слое 0-0,3 м в среднем составляет 50-150 кг С/м$^2$ и увеличивается приблизительно в три раза в слое 0-1,0 м (Национальный доклад, 2018). ЮФО выделяется наименьшими запасами углерода на покрытых лесом землях в верхнем тридцатисантиметровом слое почвы: 0,10 ± 0,02 Гт С. Низкие значения связаны, в первую очередь, с площадью самого региона и площадью лесопокрытых земель, которая значительно уступает другим федеральным округам. По средним запасам почвенного углерода (более 70 т С/га) ЮФО уступает только СКФО (Замолодчиков и др., 2018). Вместе с тем, на территории ЮФО выделяется область, на которой уже утрачено до 20% почвенного углерода в результате сельскохозяйственной деятельности (Национальный доклад, 2018).

Одновременно ЮФО относится к регионам с наиболее активным гетеротрофным дыханием почв: до 324 ± 6,0 г С/м$^2$/год (Mukhortova et al., 2021).

При зарастании естественной растительностью южных черноземов (Ростовская область) изменение баланса углерода в пределах бывшего пахотного слоя было положительным и отмечалось как накопление общего пула органического углерода, так и его различных фракций (Kurganova et al., 2019; Ovsepyan et al., 2019). Баланс для лесопокрытых земель округа близок к равновесному состоянию, отмечается слабый сток углерода: 0,03 ± 0,002 Гт С (Замолодчиков и др., 2018). Углеродный баланс почв пастбищ в большинстве случаев оценивается как отрицательный, что связано с недостаточным вниманием к управлению пастбищным хозяйством, перевыпасом и пр. (Национальный доклад, 2018).

Процесс опустынивания затронул большую часть территории ЮФО. Как отмечается авторами, причиной деградации почв и ландшафтов являются не только изменения климата, но, в большей степени, методы ведения сель-

ского хозяйства (Национальный доклад, 2019; Либеровская, Джумагазиев, 2020). Аридизация климата рассматривается как главная климатообусловленная угроза, которая может привести к значительным потерям почвенного углерода (Национальный доклад, 2018). При этом изменения гетеротрофного дыхания почв неоднозначны: на значительных площадях черноземов повышение засушливости приведет к существенному снижению активности дыхания (на 100 и более г С/м$^2$/год), а в горных районах, наоборот, к столь же сильному увеличению (Mukhortova et al., 2021).

***Водные ресурсы.*** Средние многолетние водные ресурсы ЮФО оцениваются в 301 км$^3$ в год, при этом 90% этого объема поступает с сопредельной территории, в результате транзитного стока рек Волга и Дон. Большую часть местных водных ресурсов составляют ресурсы реки Кубань. В среднем, за 1978-2020 гг. водные ресурсы ЮФО были на 11% выше, чем за предшествующий многолетний период (1936-1977 гг.). Удельная водообеспеченность территории округа при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 673 тыс. м$^3$ в год, при местных – 65 тыс. м$^3$ в год, а удельная водообеспеченность населения равна соответственно 19,2 тыс. м$^3$/год и 1,91 тыс. м$^3$/год (очень низкая). Водообеспеченность местными водными ресурсами является низкой в Краснодарском крае и катастрофически низкой в Астраханской, Волгоградской, Ростовской областях и в Республике Крым – ниже 1 тыс. м$^3$/чел. в год (Балонишникова, 2021).

В последние десятилетия произошло увеличение удельной водообеспеченности на 7% общими водными ресурсами, и водообеспеченность местными водными ресурсами осталась практически неизменной.

В горной и предгорной частях территории ЮФО в условиях происходящих изменений климата возросла опасность наводнений в результате дождевых паводков, в том числе быстроразвивающихся (Георгиевский и др., 2019). Катастрофические, ранее не наблюдавшиеся паводки с большими материальными потерями и человеческими жертвами произошли в 2004 г. на реках Кубань, Лаба, Белая, а в 2012 г. на реке Адагум.

***Сельское хозяйство.*** В ЮФО термические ресурсы за последние два десятилетия увеличились значительно: сумма температур за период активной вегетации большинства сельскохозяйственных культур увеличилась за 1998-2017 гг. на 300-320 °С по сравнению с базовым периодом. Скорости роста этого показателя и температуры календарного лета здесь самые высокие на ЕТР – это, соответственно, более 150 °С/10 лет и 0,8 °С/10 лет. Возобновление вегетации наблюдается примерно одной декадой ранее, чем в базовый период 1961-1990 гг.

За последние десятилетия наблюдается положительная тенденция роста весенних осадков практически на всей территории округа, за исключением самых засушливых областей (Республика Крым). Отрицательные тенденции количества выпадающих летних осадков прослеживаются на всей территории округа – скорость снижения составляет от 6 до 10% за десятилетие.

Повторяемость атмосферных засух на территории округа за последние 35 лет (1984-2018 гг.) составляет: в Краснодарском крае – от 20 до 30% случаев, в Ростовской области – от 20 до 35%, в Волгоградской – 30-40%. В Астраханской области и Республике Калмыкия атмосферные засухи и засушливые явления наблюдаются еще чаще – в 60-70% (Национальный доклад, 2021).

Так, за последние 35 лет в Краснодаре и на его прилегающих территориях ежегодно отмечались практически только летние засухи, охватывающие период с июля по август, за исключением 2018 года. Самые продолжительные засухи отмечены в 2018 (73 дня), 2014 (51), 2001 (50), 2010 (48) и 2012 гг. (48), длившиеся более полутора–двух месяцев (Национальный доклад, 2021).

Таким образом, неблагоприятные агрометеорологические последствия засух в большей степени сказываются на сельскохозяйственных культурах, основной период вегетации которых приходится на вторую половину летнего периода, такие как подсолнечник, сахарная свекла, соя, позднеспелые сорта кукурузы и другие культуры. Озимая пшеница, являющаяся основной зерновой культурой в этом районе, в меньшей степени подвержена засухам и засушливым явлениям, в том числе, суховеям, которые, по данным наблюдений, в этом регионе чаще всего отмечаются в июле и августе.

ЮФО играет ведущую роль в производстве зерна в России (около 25% валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом). За последние 20 лет тенденция к росту урожайности озимой пшеницы в Краснодарском крае по данным Росстата оценивается величиной пять–семь ц/га за десятилетие. Достигнутый уровень урожайности озимой пшеницы в этом регионе показывает, что применение новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур позволяет получать высокие урожаи и в условиях роста засушливости климата. Эти технологии включают агротехнические и агрономические мероприятия – приемы обработки почвы, внесение удобрений по научно-обоснованным нормам, подготовку семян к посеву, посев, уход за посевами, борьбу с болезнями и вредителями и др.

Повторяющиеся засухи и значительное увеличение сумм активных температур на территории ЮФО будут способствовать учащению и усилению вспышек размножения стадных саранчовых вредителей. Особенно вредоносны будут нашествия азиатской *(Locusts migratoria migratoria* L.) и мароккской *(Dociostaurus maroccanus* Thunb.) саранчи. Это явление может приводить к возникновению угрозы чрезвычайных ситуаций в этих районах, что требует усиленного контроля и готовности всех агротехнических служб. Также повышенная теплообеспеченность данного региона приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей: различных видов совок, зерновых клещей, яблоневой плодожорки и яблоневого листоеда. Необходимы своевременная обработка посадочного материала и вегетирующих растений инсектицидами и проведение защитных агротехнических мероприятий.

***Добывающая промышленность.*** Основные топливно-энергетические и минерально-сырьевые ресурсы ЮФО включают месторождения природного газа и нефти в Прикаспийском регионе, угля в Ростовской области, поваренной соли в Астраханской области.

Наблюдаемые тенденции увеличения температуры воздуха как в теплый, так и в холодный периоды года и некоторого уменьшения количества осадков наиболее выражены на территории Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей. Эти процессы способствуют росту пожароопасности, что обусловливает значительные риски для добычи как нефти и газа, так и угля. Более теплая погода может вызывать уменьшение добычи природного газа, т.к. рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °C приводит к падению мощности компрессорных станций (см. главу 2.3.1). С ростом тем-

пературы воздуха возрастает испарение, создавая в засушливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов, что может негативно повлиять на экологическую ситуацию в районах угледобычи в Ростовской области.

Интенсивные осадки, выпадающие за короткие интервалы времени, представляют значительную опасность для работы шахт и могут приводить к катастрофическим последствиям, т.к. шахтные дренажные системы были спроектированы на основании значений климатических данных второй половины XX века и не учитывают особенности современного климата.

Изменение температурно-влажностного режима в Астраханской и Волгоградской областях способствует нарушению водно-солевого баланса озер Эльтон и Баскунчак, где добывается до 90% поваренной соли в России. В перспективе такие процессы могут дестабилизировать добычу соли в этом регионе.

К середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (Катцов и др., 2020) (рис. 3.1.4.3б, г, 3.1.4.5е).

***Транспорт.*** Транспортный комплекс – важнейший сектор экономики ЮФО, имеющий как общероссийское, так и межрегиональное значение, т.к. благодаря географическому положению, он обладает значительным транзитным потенциалом перевозки грузов и пассажиров. Протяженность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием составляет более 100 тыс. км. По территории округа проходит Северо-Кавказская железная дорога. Важную роль в экономике округа играет водный транспорт: на его территории расположено семнадцать морских и речных портов, а порты Краснодарского края обеспечивают переработку более 40% внешнеторговых грузов России, перевозимых морским флотом. Трубопроводный транспорт представлен международным магистральным нефтепроводом «Тенгиз – Новороссийск» и магистральным газопроводом «Россия – Турция» («Голубой поток»), а также рядом региональных нефте- и газопроводов.

Столь развитая транспортная сеть при высокой повторяемости разных видов опасных метеорологических явлений подвержена высокому уровню погодно-климатических рисков. В зимний период на территории округа возможны обильные снегопады, сопровождаемые сильными ветрами и снежными заносами. В Краснодарском крае на территории Черноморского побережья отмечается высокая степень опасности гололедно-изморозевых отложений, создающих угрозы для автотранспорта, нарушающих работу портов, особенно порта Новороссийск. В горных районах Крыма часто прекращается движение автотранспорта. Так, дорога на гору Ай-Петри в Южном Крыму часто закрыта в зимние месяцы для всех видов транспорта, за исключением внедорожников с шипованными шинами и цепями противоскольжения. По значениям непрерывной и суммарной продолжительности гололедно-изморозевых отложений выделяется Республика Калмыкия, где продолжительность обледенения составляет более 1000 часов в год. Прогнозируемые повышение зимней температуры и рост количества зимних осадков увеличат повторяемость условий возможного образования гололедно-изморозевых отложений к середине XXI века. Особенно резко возрастет число дней с такими условиями в северных районах Ростовской и на всей территории Волгоградской областей (более 20%).

В летний период особенностью территории ЮФО является повышенная вероятность

аномально высоких температур. Наибольшая вероятность аномально жарких условий отмечается на территориях Республики Калмыкия, Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей. Непрерывная продолжительность периода с температурами выше 30 °С увеличивается в направлении с юго-запада на северо-восток, достигая 20 часов в Волгограде, что является причиной задержки поездов в этом регионе, иногда до пяти-семи часов, и аварий на железной дороге из-за искривления рельсов.

Одним из опасных процессов для транспорта на территории округа являются пыльные бури. Наибольшее распространение пыльные бури получили на Нижнем Дону, в нижнем Поволжье, а наиболее частому и интенсивному их воздействию подвергаются Республика Калмыкия, Ростовская и Волгоградская области. Пыльные бури влияют на безопасность движения, нередко становясь причиной ДТП, с ними связано закрытие аэропортов, прекращение движения по трассам. Причинами пыльных бурь являются сильная жара и ветер. На фоне прогнозируемого роста температуры жарких 30-дневок и увеличения периодов без осадков на три-четыре дня (Хлебникова и др., 2019 а, б), уменьшения осадков теплого периода на 5-10% (до 20% в Астраханской области) к середине XXI века (рис. 3.1.4.5г, 3.1.4.3в) на всей территории ЮФО, за исключением районов Черноморского побережья Кавказа, ожидается рост повторяемости негативных явлений теплого периода, связанных с пыльными бурями.

ЮФО – один из наиболее ливнеопасных округов России. Для побережья Черного и Азовского морей характерны частые и интенсивные ливни до 200 мм/сутки. Поэтому прогнозируемый рост максимальной суточной интенсивности осадков в Азовско-Черноморском регионе (рис. 3.1.4.5е) представляет большую опасность для автомобильного и железнодорожного транспорта, т.к. влечет за собой повышение вероятности ливневых наводнений и, как следствие, разрушение объектов транспортной инфраструктуры.

***Производство и передача энергии.*** Энергетический комплекс ЮФО представлен несколькими видами генерации, среди которых преобладают тепловые электростанции (около 60%). Самыми крупными из них являются Новочеркасская ГРЭС (Ростовская область) и Краснодарская ТЭЦ (Краснодарский край). Наряду с тепловыми станциями в округе энергию также генерируют ГЭС (29,6% в структуре установленной мощности электростанций региона). Самой мощной из них является Волжская ГЭС (Волгоградская область), которая входит в Волжско-Камский каскад и является крупнейшей на Волге и на всей территории европейской части России. Атомная энергетика представлена Ростовской АЭС. На ее долю приходится около 10% генерации электроэнергии в структуре регионального энергетического комплекса. Все указанные источники энергии являются уязвимыми к изменению климата. Эффективность и безопасность работы тепловых и атомных электростанций напрямую зависит от температуры наружного воздуха и доступности воды для охлаждения энергоблоков (см. главу 2.3.5). По данным наблюдений по второй половине XX – начале XXI веков, на юге ЕТР заметно возросли интенсивность, повторяемость и длительность волн тепла, а также число дней с температурой воздуха выше 30 °С (рис. 3.1.4.4), что обуславливает значительные погодно-климатические риски для энергетического комплекса округа.

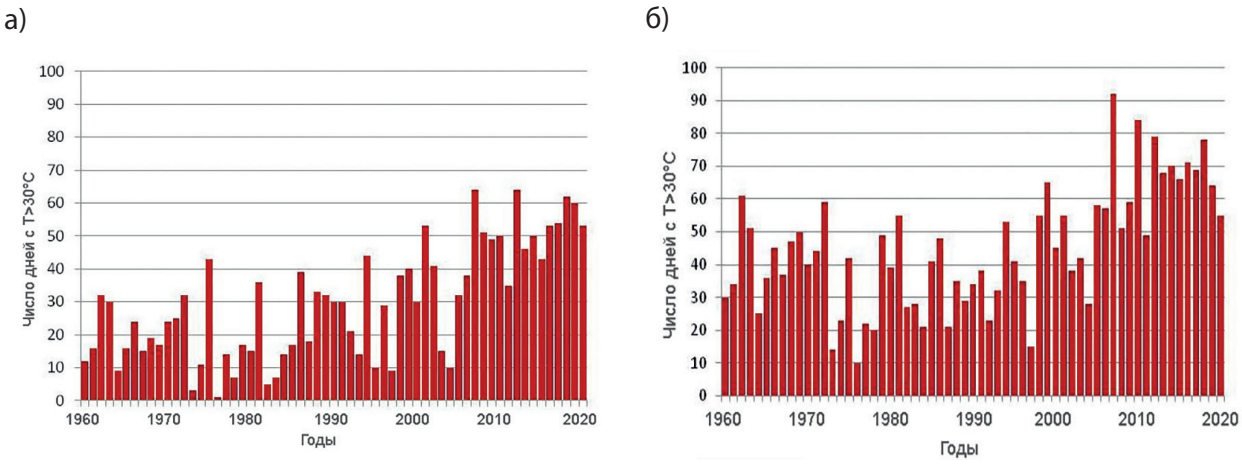



***Рис. 3.1.4.4*** *Число дней с температурой воздуха выше 30 °С, 1960-2020 гг.;*
*а) Симферополь; б) Краснодар*

Результаты сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима говорят о том, что в дальнейшем вероятно усиление наблюдаемых тенденций (рис. 3.1.4.5б, г, ж, з). Продолжительность наиболее длинной волны тепла на территории округа к середине XXI века может возрасти на 10-12 дней, а периоды с аномально высокими температурами в этом районе будут наблюдаться два – три раза в год (Shkolnik et al., 2018; Тюсов и др., 2017).

Такая тенденция может стать фактором, ограничивающим мощности ТЭС и АЭС. Кроме того, рост температуры воздуха повышает риск нехватки водных ресурсов как из-за увеличивающегося испарения с поверхности прудов-охладителей, так и в связи с возрастающим потреблением воды в сельском хозяйстве. В этих условиях оптимальным решением проблем энергодефицита ЮФО являются развитие альтернативной энергетики, максимальная экономия всех видов энергетических и водных ресурсов, а также интенсивное внедрение энергосберегающих технологий.

Увеличение производства энергии на ТЭС и АЭС в связи с ростом ее потребления приводит к росту выбросов загрязняющих веществ в ЮФО. При этом ЮФО имеет экономический потенциал по всем видам ВИЭ: солнечной, ветровой, геотермальной энергии, гидроэнергии малых рек и водотоков, а также запасов биомассы и местных видов топлива.

Наибольшим потенциалом обладает солнечная энергия – продолжительность солнечного сияния в ЮФО выше 2000 часов в год, солнечных дней в году в среднем по региону около 290, а в Астраханской области, на Ставрополье, в Республике Калмыкия более 300. Количество суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность в течение года, 1200-1400 кВт•ч/м$^2$. Валовой потенциал солнечной энергии региона составляет 800 трлн. кВт•ч/год, технический – 82 трлн. кВт•ч/год.

На 1 июня 2020 года ЮФО являлся лидером среди регионов по вводу солнечных электрических станций, общая установленная мощность введенных СЭС составляла 642 МВт. Здесь располагается самая крупная в России фотоэлектрическая установка – СЭС «Перово» (Республика Крым), установленная мощность которой составляет 105 МВт. Общая мощность действующих солнечных электрических стан-

ций, расположенных в Крыму, составляет 297 МВт. В 2020 г. была введена в действие еще одна крупная СЭС – «Старомарьевская» СЭС в Ставропольском крае (100 МВт). Всего на территории округа действует 15 СЭС с установленной мощностью от 5 до 105 МВт.

Наиболее благоприятным регионом ЮФО с точки зрения установки солнечных электростанций является Астраханская область, где в настоящее время действуют пять СЭС, две из них имеют установленную мощность 60 и 75 МВт.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование солнечной энергии для теплоснабжения. Солнечные водонагревательные установки имеют наименьшие сроки окупаемости, они технически несложны и обеспечивают хорошие экологические показатели. Удельная выработка тепловой энергии за теплый сезон в ЮФО составляет 830-950 кВт•ч/м$^2$. Коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения за счет энергии Солнца достигает 70-75% (Климатические факторы, 2010). В Краснодарском крае работает более 50 гелиоустановок горячего водоснабжения с общей площадью солнечных коллекторов более 6400 м$^2$.

Согласно оценкам будущего климата (Росгидромет, 2014), прогнозируемые в ЮФО увеличение прихода суммарной солнечной радиации на 2-4% и рост температуры положительно скажутся на работе солнечных коллекторов. Удельная выработка тепловой энергии увеличится на 50-60 кВт·ч с каждого квадратного метра установки.

Ветровая энергетика является также перспективным сектором в регионе ЮФО. Технический потенциал ветровой энергии по данным «Ростовэнергопроекта» около 400 тыс. МВт. Установленная мощность ВЭС в объединенной энергосистеме Юга 92,41 МВт (0,43% от общего количества). Размещение ветровых турбин максимально эффективно на побережьях Азовского и Каспийского морей, в Ставрополье, на юге Керченского полуострова, в Калмыкии, а также в зоне междуречья Дона и Волги. В этих районах средние годовые скорости ветра около 4 м/с (в Калмыкии – 5,1 м/с), и что очень важно, они отличаются большой устойчивостью от года к году (коэффициент вариации 15-25%). Повторяемость энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с), при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, составляет 55%, а в Республике Калмыкия более 75%. В последние 20 лет XX столетия она мало изменилась по сравнению с предшествующими десятилетиями, и в ближайшие десятилетия XXI века, согласно модельным расчетам, существенных изменений в приземных скоростях ветра не прогнозируется (Росгидромет, 2014).

В настоящее время в ЮФО действует 10 ВЭС, две из них достаточно крупные: Кочубейская (Ставропольский край, 210 МВт), Адыгейская (150 МВт), остальные мелкие, причем семь из них в Крыму. На стадии проектирования и строительства находится еще девять ВЭС.

Энергосистема ЮФО является одной из самых старых в России, поэтому общий износ электросетевого оборудования достаточно высокий. Ежегодно в осенне-зимний и летний периоды фиксируются максимумы энергопотребления, что может приводить к отключениям электроэнергии. ЮФО из-за своего географического расположения и климатических условий подвержен частым перебоям в электроснабжении. Трассы линий электропередач проходят в сложном рельефе, а резкие перепады температур в зимний период и сильные ветры создают экстремальные нагрузки на провода. В летний ту-

ристический период нагрузка на энергосистему многократно увеличивается из-за высоких температур воздуха, что приводит к аварийным отключениям электричества. Наибольший ущерб ЛЭП наносят ветровые нагрузки, повторяемость которых увеличивается. По гололедным нагрузкам территория округа относится к III, IV и V (особо опасному) гололедным районам. Экстремальные значения веса гололедных отложений на проводах воздушных линий могут достигать 4 кг. Тенденции на увеличение или уменьшение гололедных нагрузок не отмечается, однако растет повторяемость числа дней с гололедно-изморозевыми образованиями.

Согласно модельным оценкам, увеличится число переходов среднесуточной температуры через 0 °С на Европейской части России, в том числе и в ЮФО, что приведет к увеличению повторяемости числа дней с гололедными образованиями и отложениями мокрого снега.

Тенденция на увеличение повторяемости гололедных образований и сильных ветров в ЮФО может способствовать росту повторяемости сверхнормативных нагрузок, которые в свою очередь могут приводить к серьезным авариям на ЛЭП.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Изменения климата оказывают преимущественно отрицательное воздействие на функционирование в регионе ЖКХ, определяющего условия жизнедеятельности человека (комфортности жилища, его инженерного благоустройства, качества и надежности услуг транспорта, бытовых и других услуг). При современных темпах потепления существующий уровень инженерного обеспечения зданий не в полной мере обеспечивает необходимый уровень комфортности жилища и среды обитания в целом. В настоящее время число дней с максимальной температурой воздуха выше +30 °С увеличивается со скоростью четыре-пять дней/10 лет на всей территории округа (Хлебникова и др., 2021). К середине XXI века ожидается увеличение числа таких жарких дней (рис. 3.1.4.5г) до 30 суток и более на территории всех субъектов округа. При этом вырастет такой показатель как дефицит холода (рис. 3.1.4.5в), который можно рассматривать как индекс потенциального энергопотребления в теплый сезон. Наибольшее увеличение этого показателя, свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования, ожидается в Астраханской области и Республике Калмыкия (до 400 °С•сут. и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С на территории Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей, а также в Республике Калмыкия (рис. 3.1.4.5а). Эта тенденция, в сочетании с увеличением количества осадков в периоды оттепелей, приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание.

Изменение режима атмосферных осадков на территории округа негативно отразится на функционировании городского хозяйства. В холодный сезон рост суточных экстремумов осадков ожидается на всей территории округа (рис. 3.1.4.5д); в теплый сезон – на территории Краснодарского края и Республики Адыгея (рис. 3.1.4.5е). Рост суточных экстремумов осадков, сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением и затоплением инфраструктуры. Увеличение суточных экстремумов будет также

оказывать неблагоприятное воздействие на работу городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. На территории Ростовской, Волгоградской и Астраханской областей, а также в Республике Калмыкия, в теплый сезон ожидается увеличение длительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.4.5ж, з), что – в сочетании с продолжительными периодами экстремально-высоких температур (рис. 3.1.4.5г) – может вызвать проблемы с водоснабжением.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур.

***Туризм.*** На территории ЮФО расположены четыре туристических района: Республика Крым, Кавказско-Черноморский, Азовский и Нижнее Поволжье. В Крыму, Кавказско-Черноморском и Азовском (прибрежные районы Ростовской области и Краснодарского края) районах климат является туристическим ресурсом, т.е. составной частью социально экономической жизни населения региона. Продолжительный период для комфортной рекреации (с начала мая до конца октября), небольшое число пасмурных дней, теплое, но не жаркое лето, продолжительность купального сезона почти пять месяцев (с конца мая по октябрь) – все вместе это создает очень благоприятные условия для развития здесь различных видов туризма и рекреации: курортно-оздоровительного, пляжного, экологического, спортивного (дельтапланеризма, альпинизма, скалолазания, спелеотуризма), различных видов экстремального туризма. Несмотря на теплые зимы, в горах развиты зимние виды рекреации и прежде всего – горнолыжный туризм: на склонах гор в окрестностях Красной Поляны с ноября по май имеются комфортные условия для горнолыжного катания.

Рекреационные ресурсы Северного Приазовья менее комфортны: зима мягкая, но устойчивого снежного покрова не образуется и условия для зимней рекреации отсутствуют. Весна прохладная. Эти сезоны – не лучшее время для отдыха. Но лето и осень очень теплые, сухие, с обилием ясных дней.

Продолжительность комфортного пляжного сезона в базовом периоде составляет около трех месяцев, а по прогнозу на середину столетия он будет продолжаться с третьей декады мая до середины сентября. Исходя из современных социальных и экономических реалий, Приазовье – один из наиболее перспективных для развития рекреации регионов России (Росгидромет, 2014), тем более что здесь прекрасные условия для экологического туризма, бердвотчинга (наблюдения за птицами), агротуризма. Северо-восточные акватории Азовского моря, где даже в теплый сезон от 20 до 55 дней могут быть штормовыми, привлекают любителей водного туризма.

В восточных степных районах ЮФО самое благоприятное время для рекреации в июне и сентябре, когда спадает изнуряющая жара в сочетании с крайне низкой влажностью (условия «сухого зноя») и пыльными бурями. Нет здесь условий и для активных видов зимней рекреации: снежный покров либо отсутствует, либо не превышает 10-15 см.

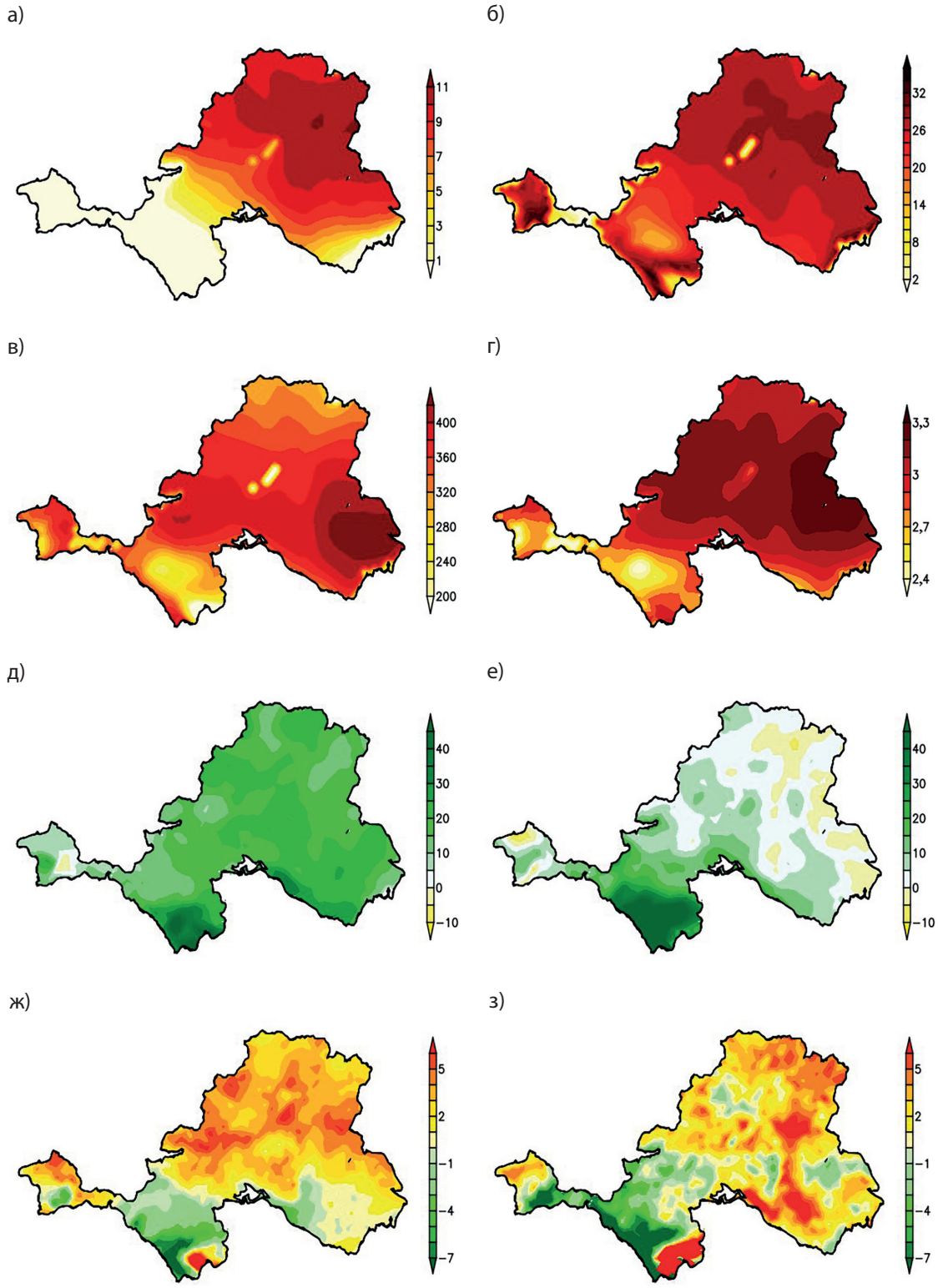



***Рис. 3.1.4.5*** *Изменение специализированных климатических показателей на территории ЮФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); б) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С (дни); в) дефицит холода (°С•сут); г) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); д) суточный максимум осадков холодного сезона (%); е) суточный максимум осадков теплого сезона (%); ж) максимальная продолжительность (дни) непрерывного периода с осадками менее 1 мм/сутки (теплый сезон); з) максимальная продолжительность (дни) непрерывного периода с осадками менее 5 мм/сутки (теплый сезон). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

К середине столетия ожидается, что климатические ресурсы пляжного туризма возрастут на всех южных побережьях, но к концу века региональные прогнозы воздействия изменения климата на показатели климатического комфорта для рекреации свидетельствуют об интенсификации неблагоприятных термических условий из-за повышения максимальных температур выше критических уровней (Махов, 2013).

Неблагоприятным для восточных областей региона станет рост летних температур, который вызовет сокращение числа комфортных для рекреации дней. Кроме того, на юге России, на фоне уменьшения числа суток с умеренной пожароопасностью, прогнозируется заметное увеличение (на 8-10 сут.) числа дней с экстремально высокой пожароопасностью. Например, в настоящее время на территории Ростовской области пожароопасная обстановка V класса составляет для отдельных пунктов наблюдений 4-6 дней/20 лет. Этот модельный прогноз следует рассматривать как весьма тревожный для экологических видов туризма.

Ожидаемые изменения количества атмосферных осадков к середине XXI в. (рис. 3.1.4.3г) также неблагоприятны для региона – повышение их в Кавказско-Черноморской зоне, где и сейчас их выпадает 400 мм за лето, и уменьшение осадков в засушливых районах станут дополнительной причиной снижения здесь туристического потока из-за потери привлекательности ландшафтов.

***Направления адаптации.*** В качестве мер по адаптации экосистем в ЮФО предлагается снижение чрезмерной пастбищной нагрузки, снятие антропогенной нагрузки, в том числе через создание и расширение существующих особо охраняемых природных территорий, для формирования экологических коридоров и климатических убежищ. Необходимо усиление мер по защите от пожаров, а сохранению и восстановлению водно-болотных угодий, защите от роста численности насекомых-вредителей. Предотвращение нарушения растительного покрова на крутых горных склонах и использование защитных лесов применяется для стабилизации склонов и уменьшения риска селей, оползней, склоновой эрозии. В равнинной части округа возможно использование экосистемных услуг в озеленении городов, лесополос и защитных лесов для сельского хозяйства. Предотвращение потерь углерода в почвах может быть достигнуто путем внедрения современных углеродосберегающих технологий в сельском хозяйстве.

С учетом учащения экстремальных явлений гидрологического характера (наводнения, быстроразвивающиеся паводки, продолжительные маловодья) адаптационные мероприятия ЮФО должны включать развитие системы гидрологического мониторинга, раннего предупреждения и оповещения об опасных гидрологических явлениях (Краснодарский край, Республика Крым), проведение комплекса мероприятий по обеспечению безопасной жизнедеятельности в потенциально затапливаемых прибрежных территориях и гарантированному водообеспечению. Для ключевого водного объекта ЮФО – Цимлянского водохранилища, требуется комплекс мероприятий как по экологическому оздоровлению, так и по актуализации Правил использования водохранилища с учетом вероятного учащения продолжительных периодов маловодий.

В сельском хозяйстве применение новых технологий возделывания сельскохозяйственных

культур позволит получать высокие урожаи и в условиях роста засушливости климата. Эти технологии включают агротехнические и агрономические мероприятия – приемы обработки почвы, внесение удобрений по научно-обоснованным нормам, подготовку семян к посеву, посев, уход за посевами, борьбу с болезнями и вредителями и др. Использование новых засухоустойчивых сортов – один из наиболее эффективных путей адаптации зернового хозяйства к изменению климата в этом регионе. В секторе горнодобычи целесообразно проводить мониторинг климатических воздействий на объекты добывающей промышленности на протяжении всего жизненного цикла, начиная от разработки проектов до вывода объектов из эксплуатации. В условиях повышения температуры воздуха необходим поиск новых решений для эффективного охлаждения подземных сооружений шахт.

Для транспортной отрасли актуальна разработка высококачественных инновационных вяжущих материалов для строительства и капитального ремонта дорожного покрытия. Внедрение современных методов логистики для регулировки интенсивности движения. Повышение высоты мостов, защита туннелей и сквозных подъездных путей. Создание берегозащитных сооружений вдоль железнодорожного пути Туапсе – Сочи проходящего непосредственно вдоль моря.

Для адаптации энергетического сектора следует повышать надежность систем охлаждения энергоагрегатов АЭС и ТЭС, развивать использование всех видов ВИЭ: солнечной, ветровой, геотермальной энергии, гидроэнергии малых рек, запасов биомассы и местных видов топлива, проводить модернизацию электросетевого оборудования и мониторинг состояния ЛЭП.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства необходимо повышение уровня инженерного обеспечения зданий, обеспечивающее поддержание оптимального микроклимата в помещениях с учетом роста экстремальных температур и энергопотребления в летний сезон. Особую актуальность приобретает задача проектирования и внедрения эффективных систем кондиционирования, максимально полно учитывающих особенности климатических условий региона. С целью предотвращения критических ситуаций с водоснабжением в условиях увеличения продолжительности периодов с дефицитом осадков желательно принятие превентивных мер, направленных на повышение эффективности водопотребления населением, а также в промышленном производстве и сельском хозяйстве. Для уменьшения влияния температурно-влажностных деформаций на ускоренное старение зданий в зимний сезон важно обеспечить использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания и повышенную коррозийную устойчивость различных элементов, а также конструктивные решения, исключающие повышение влагосодержания строительных конструкций за счет атмосферных воздействий. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

Для туристской деятельности целесообразна разработка методов стабилизации береговой

линии. Внедрение новых технологий системы управления ливневыми потоками, которые позволяют регулировать перегрузку дренажных систем и понизить ущерб природным ресурсам. Требуется обеспечение рекреационных зон пунктами выдачи воды и пунктами отдыха, оснащенными кондиционерами.

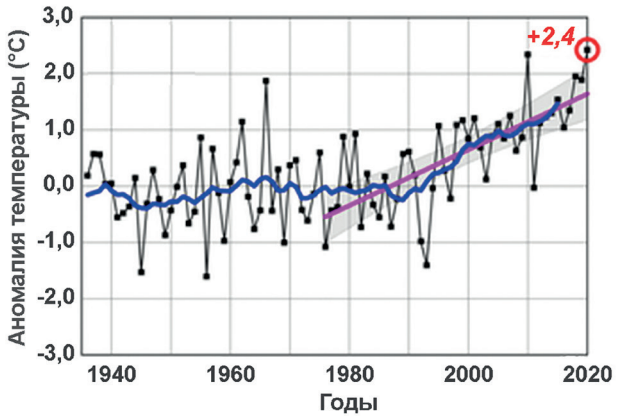
## 3.1.5 Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО)

### 3.1.5.1 Изменения климата на территории СКФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории СКФО (рис. 3.1.5.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Махачкале возросла на 1 °С, в Минеральных Водах и Нальчике на 2 °С. Рост температуры наблюдался как в теплый, так и в холодный периоды года. На территории округа отмечалось небольшое увеличение годовых сумм осадков (рис. 3.1.5.1б). Однако на фоне большой межгодовой изменчивости этого показателя такой тренд не является значимым.

В последнее тридцатилетие на территории СКФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с экстремальными осадками, наводнениями, градом (рис. 3.1.5.2).

а)




б)

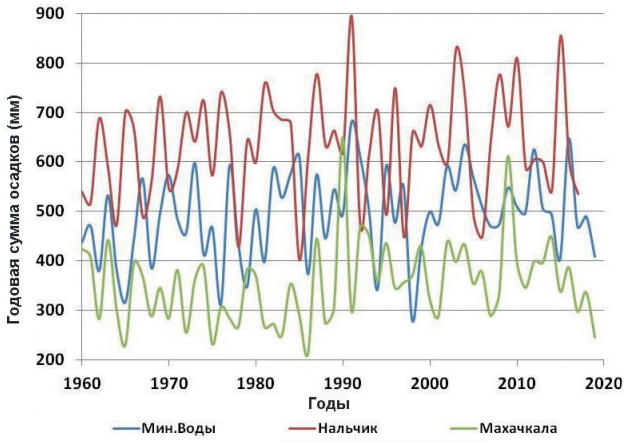



***Рис. 3.1.5.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории СКФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм, Минеральные Воды, Нальчик, Махачкала, 1960-2020 гг.*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.5.3) на всей территории СКФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2,0-3,5 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом в горных районах могут увеличиться на 10-30%, а на равнинах уменьшиться на 4-8%. Зимой на территории СКФО ожидается рост температуры воздуха на 1,5-3,5 °С, наиболее выраженный на севере округа. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 15-35%, однако на побережье Каспийского моря вероятно уменьшение зимних осадков на 3-5%.

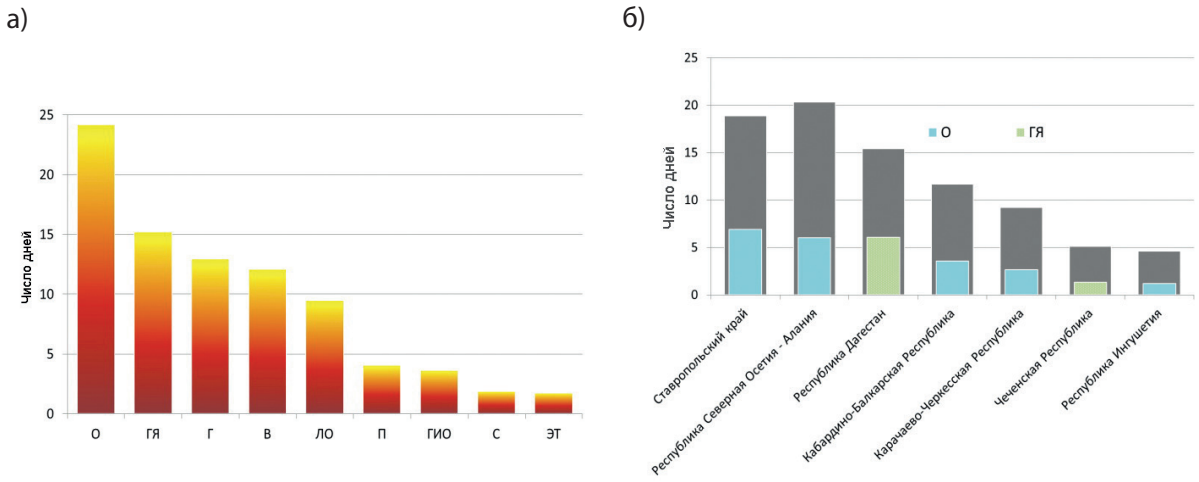



***Рис. 3.1.5.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории СКФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов СКФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data). В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

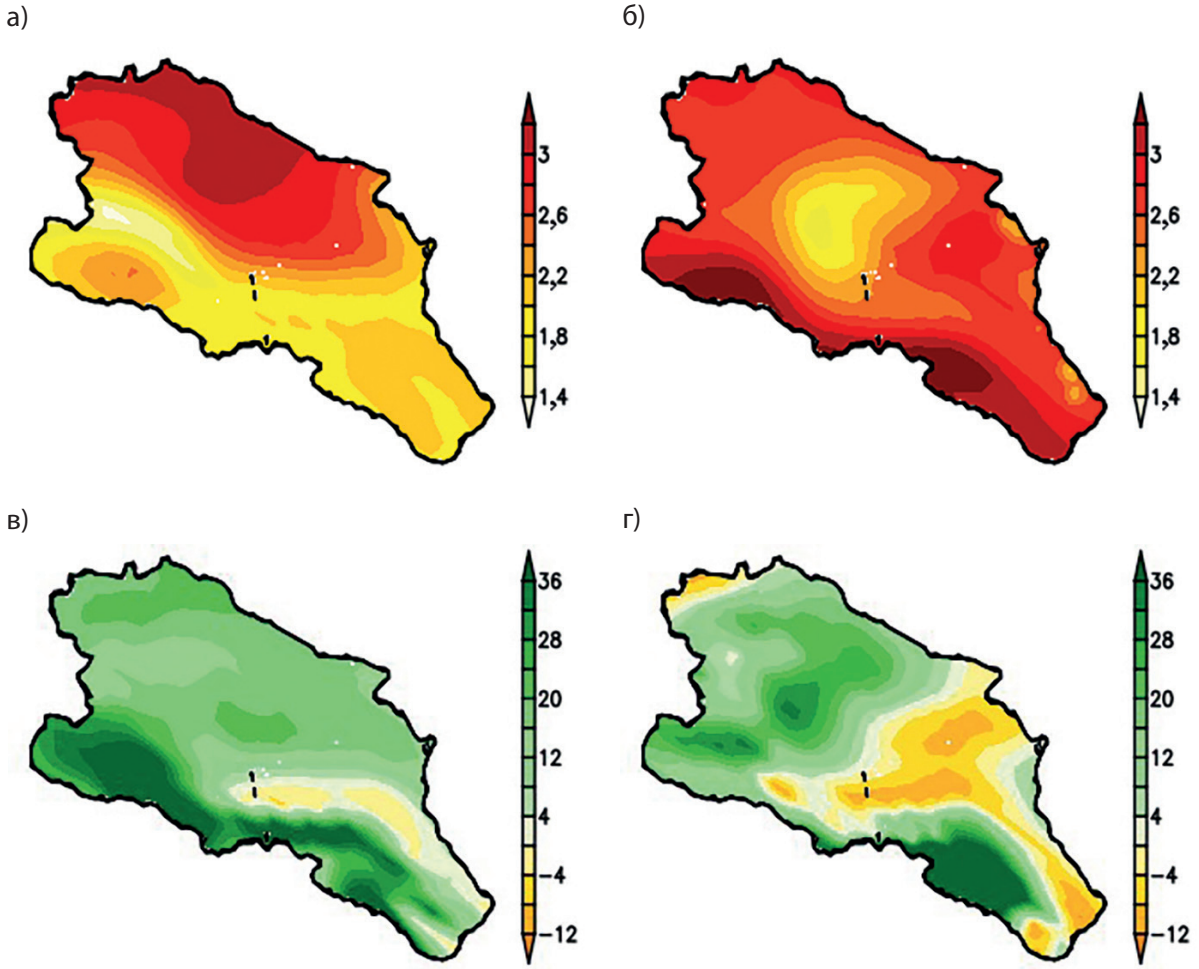



***Рис. 3.1.5.3*** *Изменение средней температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории СКФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.5.2 Природные системы и экономика СКФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** СКФО является восточным продолжением биомов ЮФО и включает южные степные, пустынные и горные биомы. Они тянутся от пустынь Прикаспийской низменности, через пояса субтропических, широколиственных и хвойных лесов к поясам субальпийских и альпийских лугов с высоким эндемизмом и биоразнообразием. Завершают высотно-поясный спектр экосистемы нивального пояса самых высоких в нашей стране горных вершин Кавказа с ледниками и снежниками.

Общие тенденции в изменении границ природных зон аналогичны тенденциям в ЮФО. Отмечается быстрая деградация ледников Центрального и Восточного Кавказа (Носенко и др., 2013; Алейников, Липка, 2016). На месте отступающих ледников в нивально-гляциальном поясе образуются озера. В работе (Лаврентьев и др., 2020) установлено, что площадь озер, потенциально угрожающих объектам инфраструктуры, может достичь 1,7 км$^2$, а объем – 130 млн м$^3$.

Изменение видового разнообразия и ареалов растений и животных происходит неоднозначно. Например, рябчик широколистный – редкий колхидско-кавказский эндемичный луговой вид высокогорий Кавказа – может не только значительно расширить площадь своих местообитаний, но и сместить основной центр ареала восточнее, тогда как на Западном Кавказе встречаемость вида значительно сократится (Пшегусов и др., 2019а). Прогнозируется значительное расширение ареалов амброзий полынолистной и трехлистной, которые являются источниками опасных для здоровья аллергенов. Даже при наиболее мягком сценарии изменений климата виды амброзии распространятся из предгорий в среднегорья, а по долинам рек могут достичь высокогорий (Пшегусов и др., 2019б). Также ожидается расширение ареала сорного растения – сорго алепского (Чадаева, Пшегусов, 2020). Тенденции изменения продуктивности во многом схожи с приведенными для ЮФО.

Уязвимость экосистем к изменению климата близка к охарактеризованной для ЮФО и связана, в первую очередь, с пожарами и засухами, в меньшей степени – с биогенными факторами. Ожидается существенный рост числа данных воздействий. Будет усиливаться деградация сохранившихся горных и предгорных болот, усугубляемая перевыпасом скота (см. главу 2.1.1). Увеличение температуры и количества осадков в теплый период в горных ландшафтах Северного Кавказа спровоцировало усиление селевой активности (Заурбеков и др., 2017). Согласно (Rets et al., 2020), для нивальных биомов Северного Кавказа максимум ледникового стока уже пройден. В речных бассейнах с площадью оледенения более 1% наблюдается снижение расхода воды в июле и августе на 4-6%/10 лет за период 1945-2018 гг. Согласно (Лурье, Панов, 2014), к концу XXI века площадь оледенения северного склона Большого Кавказа сократится на 76%, а ледниковый сток при этом уменьшится на 74-80%, что запустит каскадный эффект иссушения всех экосистем ниже по склону.

***Баланс почвенного углерода.*** Почвенный покров СКФО на 30% сформирован высотной поясностью горных ландшафтов и на 75% освоен, причем доля пашни в составе сельскохозяйственных угодий превышает 50% (Национальный атлас почв, 2011). Около четверти почвенного фонда СКФО представлено черноземами и лугово-черноземными почвами, для которых

характерны наибольшие в округе высокие запасы органического и карбонатного углерода. Вторым по значимости почвенным резервуаром углерода для округа являются разнообразные почвы горных лесов.

Удельные запасы органического углерода в метровой толще почв СКФО варьируют от очень низких (менее 40 т/га) до высоких (200-300 т/га). Суммарный пул углерода приближенно рассчитан для почв в границах участков лесного фонда: в верхних 30 см они содержат около 0,15 Гт С при отсутствии выраженного роста запасов в многолетнем тренде (Замолодчиков и др., 2018). На фоне других российских округов лесные биомы Северного Кавказа выделяются сравнительно низкой долей почвенного звена в экосистемных запасах углерода, более высокой динамичностью этих запасов и важностью учета вклада средней и нижней частей профиля в почвенный пул углерода.

Осредненные показатели эмиссии $CO_2$ почвами округа достаточно высоки и для горнолесного пояса составляют 3-4 т С/га, для степных предгорий – 4-6 т С/га и более, в почвах деградированных и малопродуктивных сообществ – снижаются до минимальных регистрируемых значений (Национальный атлас почв, 2011).

Преобладающие потери углерода почвами сельскохозяйственных угодий СКФО обусловлены их многолетней дегумификацией, связанной, в зависимости от вида угодий, с выпахиванием, пастбищной дигрессией и неблагоприятными экзогенными процессами (Хусайнов и др., 2015; Годунова и др., 2017; Газиев, 2017; Дзахмишева, Акбашева, 2017; Гедгафова и др., 2019; Асварова и др., 2021). В этих условиях можно говорить о высоком углерод-секвестирующем потенциале почвосберегающих стратегий, заложенных в целевые программы регионов СКФО.

Лесные биомы округа местами демонстрируют выраженные восстановительные тренды, которые сопровождаются накоплением углерода в подстилках и почвенном гумусе. В наибольшей степени это характерно для молодых и средневозрастных лесных насаждений, активно поглощающих углерод атмосферы и перераспределяющих его в почвенное звено экосистем; поздние лесные сукцессии, напротив, сопровождаются некоторым снижением запасов почвенного гумуса и повышением запасов углерода в лесной подстилке (Шевченко и др., 2019).

***Водные ресурсы.*** В среднем за период 1978-2020 гг. общие и местные водные ресурсы, удельная водообеспеченность СКФО были на 2% больше, чем в предшествующий многолетний период. Удельная водообеспеченность территории СКФО при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 166 тыс. м$^3$ в год, при местных – 155 тыс. м$^3$ в год.

СКФО с общей численностью населения почти 10 млн человек и с высокой плотностью населения – 58,5 человек на км$^2$, является регионом с самой низкой в России водообеспеченностью населения – около 4 тыс. м$^3$ на человека в год (Балонишникова, 2021). Наибольший дефицит водных ресурсов отмечается в Республике Ингушетия и в Ставропольском крае. Водообеспеченность местными водными ресурсами в этих субъектах составляет 1,1 и 0,4 тыс. м$^3$ на человека в год, соответственно. В СКФО во всех субъектах отмечается тенденция снижения водообеспеченности в течение периода 1978-2020 гг. за счет увеличения численности населения при стабильности водных ресурсов.

Водные ресурсы основных рек СКФО – Терека, Сулака и Самура – интенсивно используются для обеспечения нужд населения, орошаемого

земледелия, энергетики. Сток реки Сулак зарегулирован Меатлинской ГЭС, в бассейне реки Терек функционируют многочисленные гидротехнические сооружения, каналы. Река Самур является трансграничной, ее водные ресурсы используются на территориях как России, так и Азербайджана. Сток рек Сулак и Самур снизился в последние десятилетия соответственно на 6% и 12%, а реки Терек увеличился на 8%.

В последние десятилетия на отдельных реках СКФО возросла повторяемость больших расходов воды при прохождении дождевых паводков (Георгиевский и др., 2019).

***Сельское хозяйство.*** На Северном Кавказе наблюдается повсеместный рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур. Тенденции изменений условий тепло- и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в регионе во многом сходны с их изменениями в ЮФО. Темпы роста сумм температур выше 10 °С превысили в ряде районов 100 °С за 10 лет, что, наряду с увеличением продолжительности вегетационного периода до пяти–шести суток за 10 лет, свидетельствует о возможности расширения посевов теплолюбивых культур, в том числе засухоустойчивых – кукурузы, сои, сорго.

Повторяемость засухи в регионе, как опасного природного явления, приводящего к значительным потерям урожайности, за последние десятилетия составляет от 20% в центральной степной зоне до 65% в восточной сухостепной зоне.

В связи с потеплением климата может быть поставлен вопрос о дальнейшем развитии в этом регионе зоны субтропического земледелия, возобновлении возделывания хлопчатника, расширении площадей посевов сои, дальнейшем развитии виноградарства.

Так же, как и в ЮФО, прогнозируются повторяющиеся вспышки массового размножения стадных саранчовых вредителей. Наиболее вредоносными, так же, как и в ЮФО, будут виды азиатской *(Locusts migratoria migratoria* L.*)* и мароккской *(Dociostaurus maroccanus* Thunb.*)* саранчи. Возможность возникновения частых угроз чрезвычайных ситуаций и повышенной готовности к чрезвычайным ситуациям в этих районах требует усиленного мониторинга и готовности всех агротехнических служб в данном регионе. Увеличение сумм активных и эффективных температур приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей: лугового мотылька, различных видов зерновых совок и клещей, вредителей плодово-ягодных культур. Необходим своевременный контроль и агротехническая обработка почвы, семенного материала и вегетативных частей сельскохозяйственных культур.

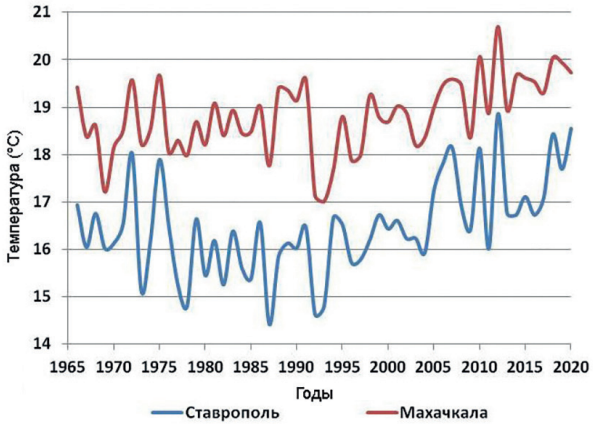
***Добывающая промышленность.*** Добывающая промышленность СКФО представлена предприятиями по добыче природного газа и газового конденсата в Ставропольском крае, Республике Дагестан и Чеченской Республике. Добыча меди, золота, серебра и металлов платиновой группы ведется в Карачаево-Черкесской Республике.

Наблюдаемый рост температуры воздуха как в теплый (рис. 3.1.5.4а), так и в холодный периоды года создает риски уменьшения добычи газа, т.к. более теплая погода приводит к падению мощности компрессорных станций (см. главу 2.3.1).

Повышение интенсивности осадков в Северо-Кавказском регионе (рис. 3.1.5.4б) представляет значительную опасность для работы шахт, т.к. шахтные дренажные системы были спроекти-

рованы на основании значений климатических данных второй половины XX века и не учитывают особенности современного климата. Интенсивные осадки могут также усилить эрозионные процессы, ведущие к обрушению склонов карьеров.

а)




б)

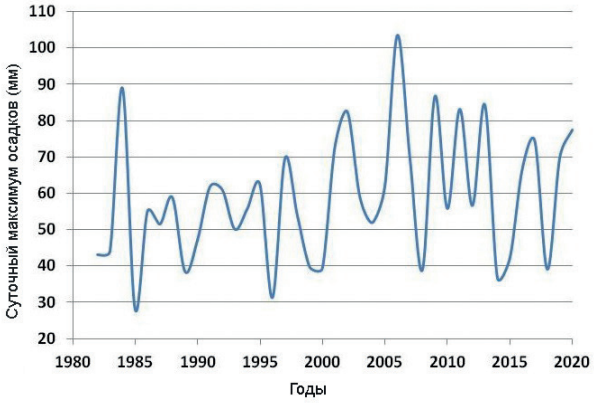



***Рис. 3.1.5.4*** *Изменение температурно-влажностного режима в СКФО; а) средняя температура воздуха в теплый период года (апрель – октябрь), °С, Ставрополь, Махачкала; б) Суточный максимум осадков, мм, Владикавказ*

По результатам климатического моделирования, ожидается интенсификация наблюдаемых изменений температурно-влажностного режима (рис. 3.1.5.3б, г, 3.1.5.5е).

Для обеспечения надежной и эффективной работы объектов добывающей промышленности СКФО необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

***Транспорт.*** Транспорт – одна из ведущих отраслей экономики СКФО, на долю которой приходится около 10% валового регионального продукта. По территории округа проходят главные направления Северо-Кавказской железной дороги, здесь проложено около 25 тыс. км автодорог общего пользования, расположено семь аэропортов, а Махачкалинский морской торговый порт является одним из основных звеньев системы транспортной коммуникации на Каспийском море. Разветвленную сеть имеет трубопроводный транспорт: по территории района проходят трубопроводы Каспийского трубопроводного консорциума, Баку-Новороссийск и участок «Голубого потока».

Основными проблемами дорожной инфраструктуры, связанными с погодно-климатическими условиями региона, являются высокие летние температуры в ряде субъектов региона, селевая и лавинная обстановка в горных и предгорных районах. Также для СКФО характерны самые значительные в России образования гололедно-изморозиевых отложений и их наибольшая продолжительность.

Наблюдаемые и прогнозируемые изменения термического и влажностного режимов на территории СКФО (Хлебникова и др., 2019 а, б), в целом будут оказывать негативное вли-

яние на транспортную отрасль региона. Повышение температуры в летний сезон приведет к росту числа дней с экстремально высокими температурами. Уже сейчас в районе расположения трасс федерального значения «Астрахань–Ставрополь» и «Астрахань–Махачкала» ежегодно отмечается в среднем более 50 дней с температурами выше 30 °С, что тормозит работу тяжеловесных транспортных средств, движение которых ограничивается при значениях дневной температуры воздуха свыше 32 °С. Возможна деформация железнодорожных путей Северо-Кавказской железной дороги, особенно на участках Ставрополь–Элиста и Кизляр–Олейниково.

Ожидаемые изменения режима осадков также скажутся крайне негативно для транспортной отрасли, особенно в горах и предгорьях округа (Хлебникова, Салль, 2012). Повысится опасность образования селевых потоков, разрушающих объекты транспортной инфраструктуры, т.к. для территории Северного Кавказа наиболее характерны сели дождевого генезиса. Самый большой ущерб от селевых процессов отмечается в Кабардино-Балкарии и в Северной Осетии, где сосредоточены участки наиболее значительных разрушений транспортных коммуникаций, связанных с селями, и именно в этих районах ожидается увеличение количества летних осадков до 30%. В Ставропольском крае увеличится паводковая опасность. Сейчас здесь подвержены затоплению участки, на которых расположены федеральные автодороги «Астрахань – Ставрополь» и «Кочубей – Минеральные Воды». В случае продолжительных осадков, возможно возникновение остропикового половодья на реках Малка, Чегем, Черек, Терек и других.

Зимой прогнозируется увеличение сумм осадков вдоль всего хребта Большого Кавказа (рис. 3.1.5.3в). Обильные снегопады спровоцируют еще большую опасность схода снежных лавин, т.к. в целом для этого региона 75% лавин по генетическому типу относятся к лавинам, сходящими во время снегопадов. Самым лавиноопасным районом на Северном Кавказе является Транскавказская магистраль, где на 28 километрах от Бурона до Северного портала расположено более 200 лавинных очагов.

***Производство и передача энергии.*** В структуре электроэнергетики СКФО преобладают тепловые электростанции. Наиболее крупные из них – Ставропольская и Невинномысская ГРЭС. Второе место в системе генерации округа занимают ГЭС. На территории округа расположено более 20 больших и малых ГЭС. Негативное влияние меняющегося климата на функционирование тепловых станций выражается, прежде всего, в возрастании максимальных температур воздуха и увеличении длительности и повторяемости периодов с жаркой погодой (см. главу 2.3.5).

Рост температуры воздуха ведет к нагреванию воды в прудах-охладителях и снижает эффективность генерации энергии. Водоемом-охладителем для Ставропольской ГРЭС является небольшое Новотроицкое водохранилище. Из-за увеличения испарения и более частых засушливых периодов в этом регионе возникают риски нехватки воды с температурой, необходимой для охлаждения агрегатов ГРЭС, а, следовательно, снижения эффективности системы охлаждения и КПД электростанции (Промышленные системы охлаждения, 2016). К середине XXI века в этом регионе ожидается дальнейший рост летних температурных экстремумов, который составит около 3 °С по сравнению с 1990-1999 гг. (Хлебникова и др., 2019 а) (рис. 3.1.5.5г).

При высоком уровне изношенности электросетевой инфраструктуры и оборудования объектов генерации энергетика округа нуждается в масштабном обновлении с учетом детальной информации о современном и будущем климате. Энергобезопасность высокогорных и отдаленных районов СКФО может быть повышена за счет более широкого использования возобновляемых источников энергии: малых ГЭС, ветро- и гелиоустановок. Однако надо иметь в виду, что малые ГЭС на горных реках вырабатывают энергию преимущественно в период половодья. Их недостатком является спад мощности в зимнее время года, когда энергопотребление растет. Это приводит к дефициту электроэнергии зимой и ее избытку летом. Поэтому, для оптимизации энергетического баланса в этих районах, необходим комплексный подход с привлечением всех возможных источников энергии и экономических оценок эффективности их использования.

СКФО испытывает дефицит электроэнергии, который со временем будет возрастать. Этот факт, а также необходимость повышения экологичности топливно-энергетического комплекса региона, где располагается много туристических и санитарно-курортных зон, делают проблему использования альтернативной энергетики в регионе чрезвычайно актуальной.

Северо-Кавказский регион обладает большими ресурсами солнечной энергии. Удельный валовой приход солнечной энергии составляет 1330-1390 кВт·ч/м$^2$ в год, однако широкого применения этой энергии в настоящее время нет. В Ставропольском крае действует Старомарьевская СЭС мощностью 25 МВт, строится Кисловодская СЭС суммарной пиковой мощностью 24 МВт с прямым преобразованием солнечного излучения в электрическую энергию.

В Дагестане общий валовой потенциал ресурсов солнечной энергетики, составляющий 8,6 млрдт.у.т., только начинает реализовываться. Суммарная величина этого потенциала существенно превышает все актуальные и перспективные уровни потребления топливно-энергетических ресурсов в Дагестане вплоть до 2050 года и позволяет решить проблемы его энергоснабжения на качественно новом уровне. В настоящее время вступила в строй солнечная электростанция установленной мощностью 5 МВт в Каспийске, и ведутся работы по проектированию еще двух СЭС общей мощностью 45 МВт.

В Республиках Дагестан и Ингушетия, в Ставропольском крае имеется большой потенциал для развития ветроэнергетики. Удельный валовой потенциал энергии ветра в этих регионах составляет 420, 245 и 175 кВт·ч/м$^2$ в год, соответственно (Справочник, 2010).

Использование возобновляемых источников энергии для обеспечения экономической и энергетической безопасности в субъектах СКФО является весьма перспективным в силу природно-климатических условий региона и технико-экономического состояния топливно-энергетического комплекса.

СКФО характеризуется наибольшим для территории России числом опасных явлений – гроз, сильных ветров, гололедных отложений, наносящих большой ущерб для воздушных линий. На территории СКФО выделяется несколько гололедных и ветровых районов, от II до VI (СП, 2016). Кроме того, этот регион характеризуется интенсивной грозовой деятельностью. Влияние неблагоприятных погодных условий (или их совместное воздействие) может приводить к перебоям в поставках электроэнер-

гии. По данным ОАО СО ЕЭС (https://minenergo.gov.ru/node/15274) на линиях ПАО «Россети Северный Кавказ» основной причиной аварийности на объектах электросетевого хозяйства в 2019 году стала низкая грозоупорность высоковольтной линии 110 кВ в V гололедном районе (предгорьях Карачаево-Черкесской Республики и Республики Дагестан, восточном и западном районах Ставропольского края). Число отключений значительно выросло по сравнению с 2018 годом (91 отключение и 51 соответственно).

Для высоковольтных линий опасны такие неблагоприятные явления погоды как сильный ветер и гололедно-изморозевые отложения. Именно они приводят к наиболее серьезным авариям на линиях электропередач, устранение последствий от которых наиболее сложно. На территории СКФО опасные явления с ветром и гололедом, наносящие ущерб, наблюдаются ежегодно. За последние 30 лет отмечается рост повторяемости этих явлений.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Изменения климата оказывают преимущественно отрицательное воздействие на функционирование в регионе ЖКХ, определяющего условия жизнедеятельности человека (комфортности жилища, его инженерного благоустройства, качества и надежности услуг транспорта, бытовых и других услуг). При современных темпах потепления существующий уровень инженерного обеспечения зданий не в полной мере обеспечивает необходимый уровень комфортности жилища и среды обитания в целом. По данным наблюдений, частота появления в 1991-2020 гг. значений годового максимума температуры, превышающих 90-й процентиль для периода 1961-1990 гг., увеличилась примерно в 2,5 раза на всей территории округа. Число дней с максимальной температурой воздуха выше +30 °С в Ставропольском крае на интервале 1961-2020 гг. увеличивалось со скоростью более 5 дней/10 лет (Хлебникова и др., 2021). К середине XXI века увеличение числа таких жарких дней (рис. 3.1.5.5б) составит на равнинной территории округа около 25 суток. При этом вырастет такой показатель как дефицит холода (рис. 3.1.5.5в), который можно рассматривать как индекс потенциального энергопотребления в теплый сезон. Наибольшее увеличение этого показателя, свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования, ожидается на территории Ставропольского края, где оно достигнет величины 350 °С•сут.

На территории Ставропольского края и в Карачаево-Черкессии ожидается увеличение суточных экстремумов осадков как в холодный, так и в теплый сезоны (рис. 3.1.5.5д, е). Рост суточных экстремумов осадков, сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением и затоплением инфраструктуры. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на работу транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения строительных работ. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ (рис. 3.1.5.5а). Однако рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на их стоимости.

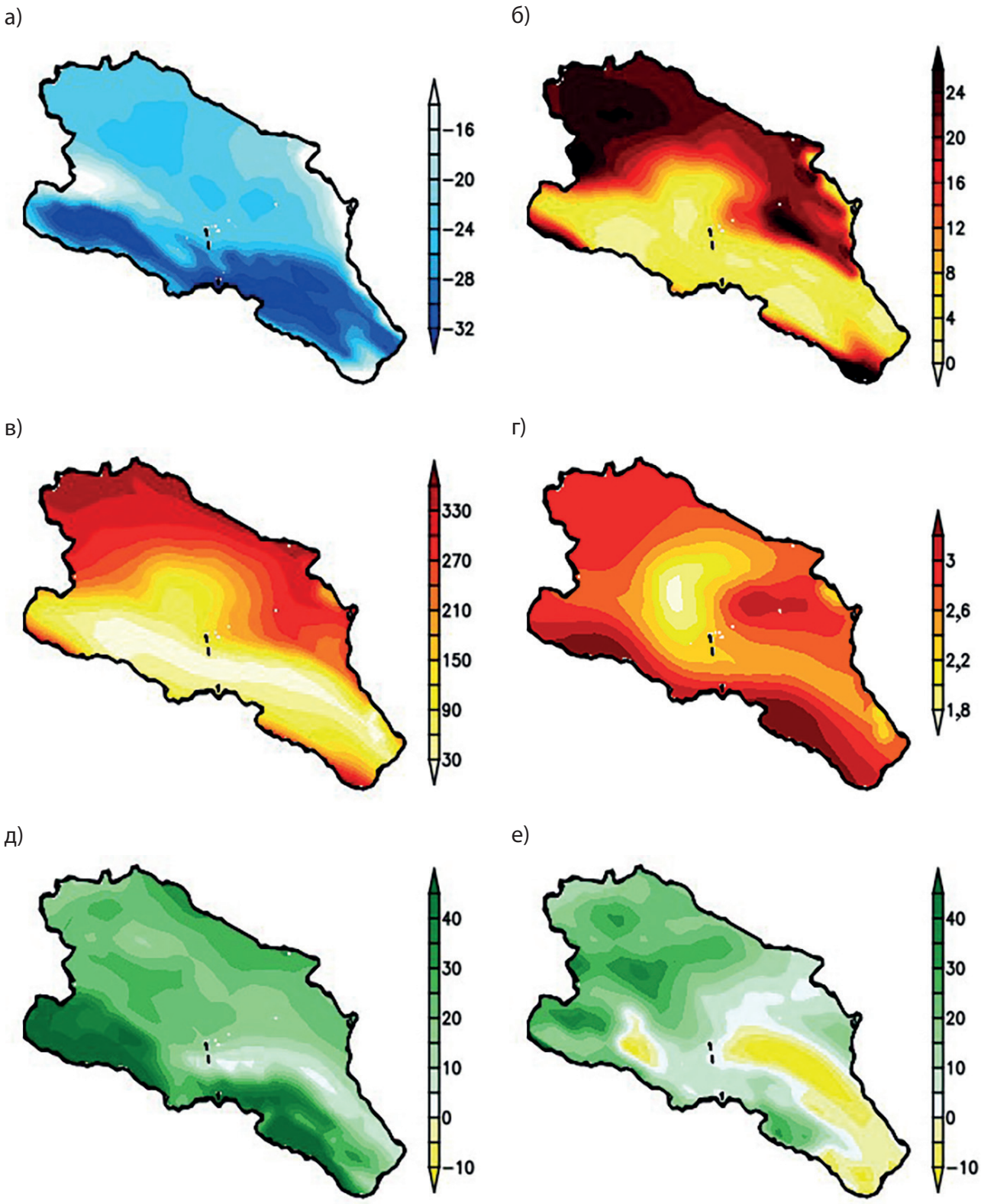



***Рис. 3.1.5.5*** *Изменение специализированных климатических показателей на территории СКФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха (дни); б) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С (дни); в) дефицит холода (°С•сут.); г) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); д) суточный максимум осадков холодного сезона (%); е) суточный максимум осадков теплого сезона (%). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур (рис. 3.1.5.5г).

***Туризм.*** Территория СКФО включает три рекреационных района: Северо-Кавказский, Каспийский и Горно-Кавказский. Климат Северо-Кавказского федерального округа крайне неоднороден. На его небольшой территории расположено, четыре климатических пояса, что связано с неоднородностью рельефа: умеренно-континентальный (северная часть Ставропольского края), умеренно-теплый (низкогорье до 800-1200 м), умеренно влажный в среднегорье (1200-2000 м) и умеренно холодный на высотах 2000-4000 м.

Огромный потенциал имеет здесь лечебно-оздоровительный туризм. В регионе Кавказские Минеральные воды есть все условия для развития рекреационной деятельности и прежде всего уникальные природно-климатические условия. Здесь сосредоточено более 100 источников минеральной воды 18 типов. Такого разнообразия больше нет нигде в мире, а лечебные грязи Тамбуканского озера не имеют аналогов. Температурный режим летом колеблется в диапазоне 14-24 °С. Район отличается самым большим в регионе числом солнечных дней (в Кисловодске свыше 300 солнечных дней в году). Влажность воздуха в дневное время – около 50%. Дожди выпадают преимущественно в виде ливней. Разнообразие рельефа создает различия в климате курортов: в Пятигорске лето теплое, зима умеренно мягкая, в Кисловодске хорошо отдыхать в зимнее время (зимой здесь стоит ясная сухая погода), а климат Железноводска соответствует горно-лесному климату среднегорий. Регион находится в непосредственной близости от теплых морей, поэтому туристы могут сочетать лечение с поездками на пляжи Черного и Каспийского морей. Кроме того, около курортов создана сеть рекреационных водохранилищ (купание, катание на лодках).

Развиты здесь и водные виды туризма и рекреации. Горные реки, стекающие с большой скоростью со склонов Большого Кавказа (Уруп, Кубань, Егорлык и др.), служат для занятий водным слаломом и рафтингом. На побережье Каспийского моря, при решении проблем экологии и безопасности, возможно развитие индустрии пляжного туризма.

Еще одним популярным в СКФО видом рекреации является горный туризм – путешествие в горах по склонам, гребням, ледникам, через перевалы и горные потоки. Наиболее популярны горный туризм и традиционный альпинизм в Северной Осетии, Кабардино-Балкарии и Ингушетии. Существуют возможности развития экстремальных видов туризма (парапланеризма, джиппинга (путешествия на автомобилях высокой проходимости с преодолением естественных препятствий), а также экологического и познавательного туризма. Климат горных районов зимой способствует и развитию горнолыжного спорта, благодаря продолжительному (четыре – пять месяцев, в высокогорье – до семи месяцев) залеганию снежного покрова (высотой 50-100 см), а также обилию солнечных дней при безветренной погоде. Сегодня в окру-

ге работает девять горнолыжных комплексов. Создано несколько туристско-рекреационных особых экономических зон, из них активно развиваются «Архыз» в Карачаево-Черкесии, «Эльбрус» в Кабардино-Балкарии, «Ведучи» в Чечне и «Армхи» в Ингушетии. Горный рельеф является одним из главных факторов развития оздоровительно-познавательного отдыха, пешеходного туризма и привлекает большое число экскурсантов.

Изменение климата в СКФО будет негативно влиять на индустрию туризма:

– В летние месяцы из-за роста приземной температуры воздуха (рис. 3.1.5.3б), в условиях недостаточного увлажнения на Северном Кавказе, ожидается снижение туристической привлекательности на курортах региона Кавказских Минеральных Вод и пляжного туризма на берегах Каспийского моря в высокий туристический сезон. В высокогорных областях северного склона Большого Кавказа повышение температуры вызовет увеличение скорости деградации ледников (Керимов и др., 2018), и, следовательно, рост продолжительности селеопасных периодов, повторяемости селей и увеличением их объемов.

– Ожидаемый к середине XXI века рост количества атмосферных осадков (до 30%) в горных районах Кавказа в зимний период, казалось бы, должен создавать здесь благоприятные условия для развития зимнего туризма, однако это вызовет широкое распространение новых лавиноопасных участков, т.к. основным фактором лавинообразования является интенсивность прироста снежного покрова, а продолжительность лавиноопасного периода начинается практически с момента образования устойчивого снежного покрова и длится до его разрушения. Летний же рост осадков в юго-восточной и юго-западной частях Северного склона спровоцирует возрастание селевой опасности: для Кавказа дожди и ливни являются причиной 85% схода селей. Практически ежегодно в результате схода лавин и селей гибнут люди.

– Ожидаемое увеличение числа случаев стихийных бедствий также создает угрозу туристам и инфраструктуре.

Таким образом, разрушительные стихийные процессы в Приэльбрусье, в значительной степени обусловленные изменением климата, являются серьезной проблемой для рекреационного развития территории. Многие из имеющихся маршрутов и районов расположения существующих и вновь создаваемых горнотуристических комплексов находятся здесь под угрозой проявления опасных природных процессов, а некоторые уже испытали воздействие этих явлений (Разумов и др., 2012).

***Направления адаптации.*** Возможные направления адаптации видов и экосистем, использования экосистемных услуг для адаптации в СКФО аналогичны предложенным для ЮФО, с учетом меньшего риска вспышек численности насекомых-вредителей.

Управление водными ресурсами в СКФО должно включать развитие инфраструктуры по предотвращению и снижению ущербов от быстроразвивающихся паводков и селевых потоков.

В сельском хозяйстве целесообразно более широкое внедрение влагосберегающих технологий, расширение посевов засухоустойчивых культур, расширение посевов озимых культур, расширение орошаемых площадей. При росте термических ресурсов может быть поставлен вопрос о дальнейшем развитии в регионе зоны

субтропического земледелия, возобновлении возделывания хлопчатника, расширении площадей посевов сои, дальнейшем развитии виноградарства.

В горнодобывающей отрасли для обеспечения безопасной работы шахт и карьеров необходима модернизация дренажных систем с учетом наблюдаемых и прогнозируемых изменений температурно-влажностного режима, мониторинг состояния хвостохранилищ с целью минимизации ущерба от их разрушения, от фильтрационных потерь.

Для обеспечения бесперебойной работы Северо-Кавказской железной дороги необходимо расширить сеть снеголавинных станций, дополнив ее автоматическими метеорологическими станциями в высокогорных районах, усовершенствовать методы прогноза лавин, а также создать более эффективную систему предупреждения населения о лавинной опасности. В Ставропольском крае необходимо разрабатывать моделирование транспортных потоков в летнее время.

Для адаптации энергетической отрасли, с учетом высокого уровня изношенности электросетей и оборудования объектов генерации, необходима масштабная модернизация энергетической инфраструктуры, включая повышение надежности систем охлаждения ТЭС. Целесообразно более широкое использование ВИЭ: малых ГЭС, ветро- и гелиоустановок. Мерами адаптации ЛЭП может служить повышение грозоупорности высоковольтных линий, борьба с гололедообразованием (применение систем плавок гололеда).

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства – в особенности, на территории Ставропольского края, – необходимо повышение уровня инженерного обеспечения зданий, обеспечивающее поддержание оптимального микроклимата в помещениях с учетом роста экстремальных температур и энергопотребления в летний сезон. Особую актуальность приобретает задача проектирования и внедрения эффективных систем кондиционирования, максимально полно учитывающих особенности климатических условий региона. В связи с ростом суточных экстремумов осадков на территории Ставропольского края и в Карачаево-Черкессии для предотвращения затопления инфраструктуры актуальна модернизация систем водоотведения на основе обновленных нормативных значений интенсивности осадков. В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с длительным воздействием экстремально-высоких температур.

Для обеспечения безопасности туристов в условиях роста числа опасных явлений в регионе, необходима разработка мероприятий для повышения готовности к чрезвычайным ситуациям, внедрение и усовершенствование системы предупреждения и эвакуации туристов, а также создание инфраструктуры предотвращения лавин. Закрепление побережий Каспийского моря «биологическим» методом, основой которого является культивирование влаголюбивых растений в прибрежной зоне.

## 3.1.6 Уральский федеральный округ (УФО)

### 3.1.6.1 Изменения климата на территории УФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха наблюдается на всей территории УФО (рис. 3.1.6.1а). В период с 1960-по-2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Салехарде возросла примерно на 3 °С, в Ханты-Мансийске и Екатеринбурге на 2 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Увеличение сумм осадков и в теплый, и в холодный периоды года наиболее выражено в северной части УФО (рис. 3.1.6.1б). На юге округа количество осадков возрастало преимущественно в холодный период.

а) б)

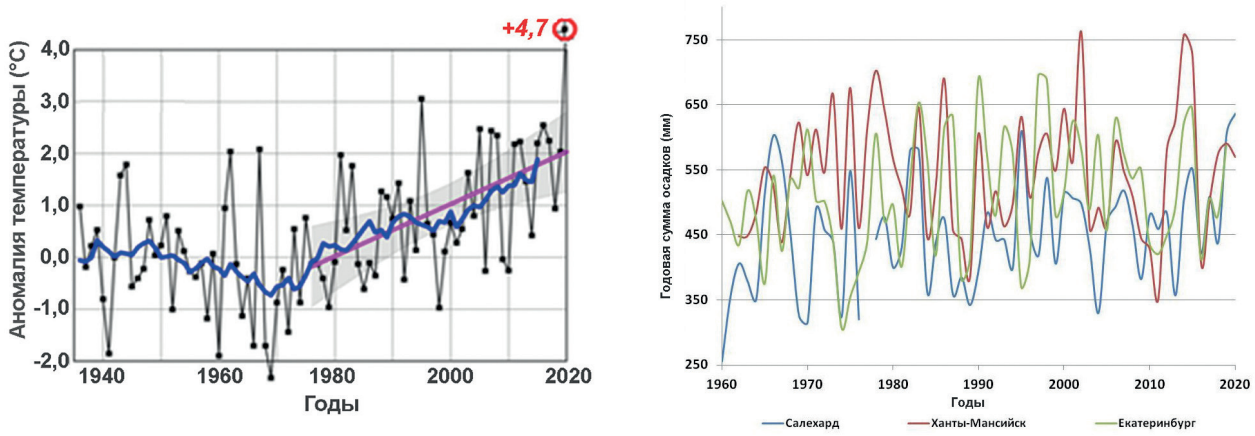



***Рис. 3.1.6.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории УФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм. Салехард, Ханты-Мансийск, Екатеринбург.1960-2020 гг.*

а) б)

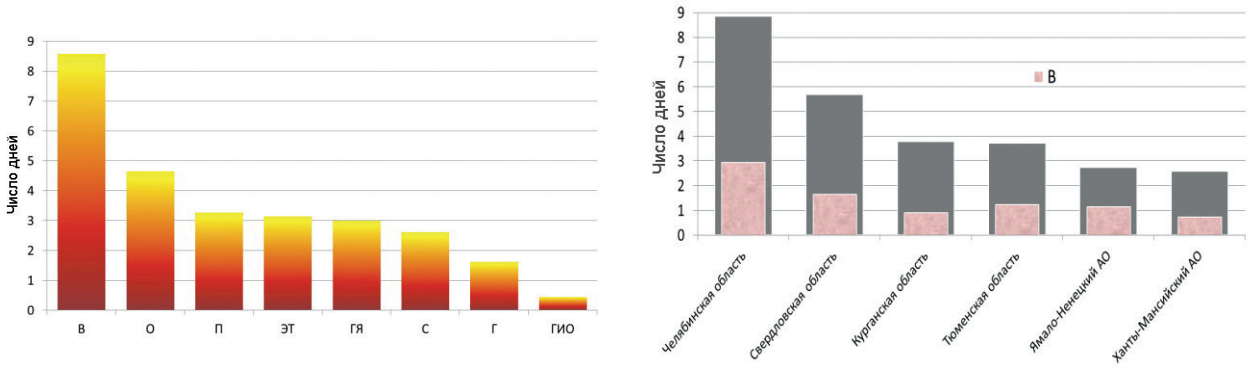



***Рис. 3.1.6.2.*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории УФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов УФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data). В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

В последнее тридцатилетие на территории УФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными осадками и пожароопасностью (рис. 3.1.6.2).

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.6.3) в западной и юго-западной частях УФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2-3 °С, в восточной части на 1-2 °С (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом на севере округа могут возрасти на 5-10%, а на юге – уменьшиться на 5-10%. Зимой в северной и центральной частях УФО возможен рост температуры воздуха на 5-8 °С, в южной части – на 3-5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20-40%, а на побережье Северного Ледовитого океана – 50-60%.

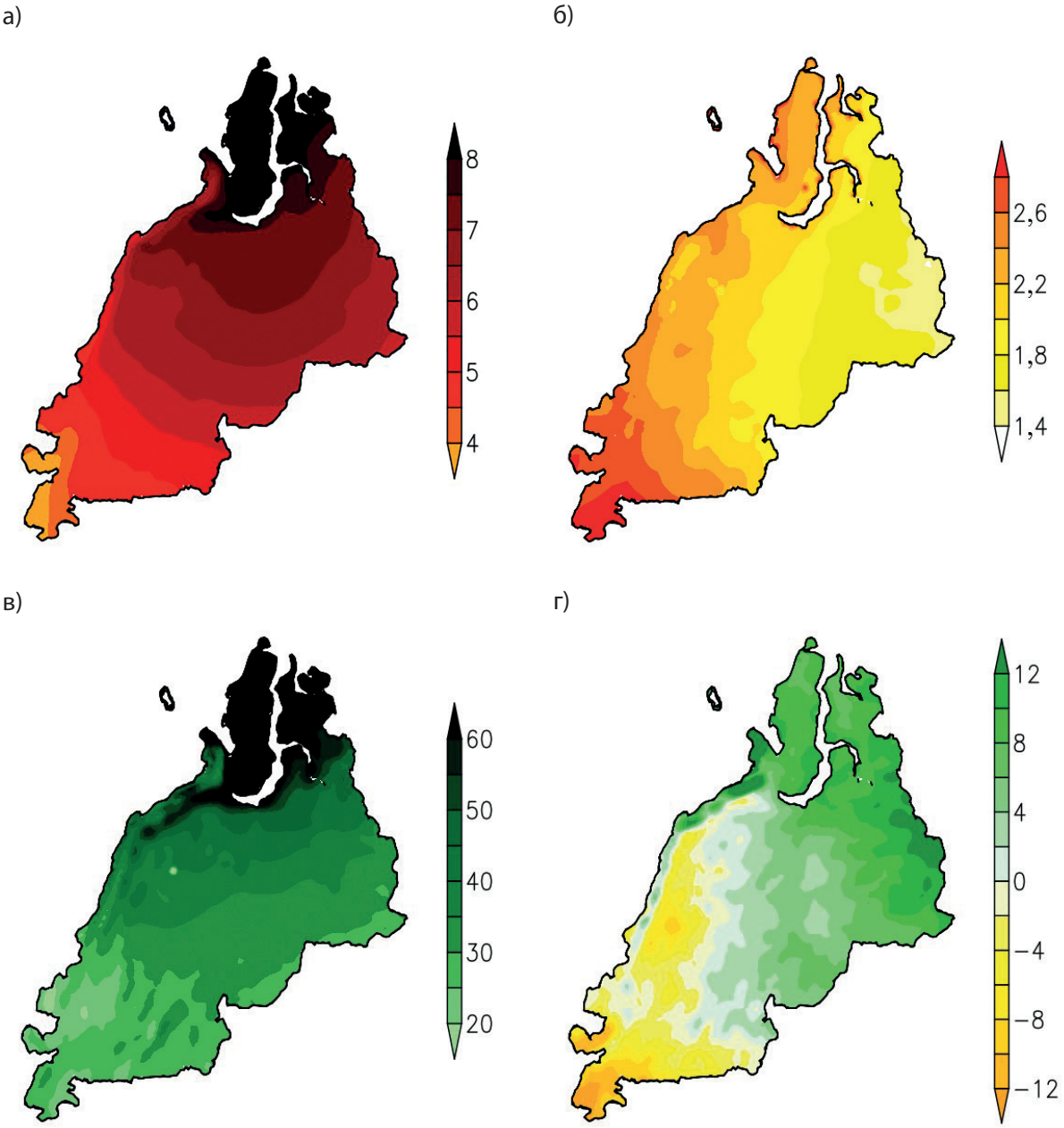



***Рис. 3.1.6.3*** *Изменение средней температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории УФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.6.2 Природные системы и экономика УФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** Территория УФО преимущественно равнинная. Здесь выражен зональный ряд экосистем с переходом от арктических и гипоарктических тундр через лесотундру и широкие подзоны северной, средней и южной тайги к подтайге и лесостепи. Особенность зонального ряда состоит в необычайно широком развитии болот. Подтайга представлена осиново-березовыми лесами, переходящими в колочную (островную) лесостепь. В западной части к Западно-Сибирской равнине примыкает Уральский хребет, для которого характерно широкое развитие лиственничных и сосновых лесов при значительно меньшей площади елово-пихтовых горных лесов.

Появились новые свидетельства продвижения деревьев в горные тундры и степи, интенсивного воспроизводства и повышения продуктивности древостоев в последние 30-100 лет в Уральских горах (Шиятов, Мазепа, 2015; Моисеев и др., 2018; Zolotareva, Zolotarev, 2017; Sannikov et al., 2018; Fomin et al., 2020; Gaisin et al., 2020). Сопоставлением данных и станционного зондирования 2000 и 2014 гг. выявлено появление новых участков леса и кустарниковых зарослей в долинах рек и на склонах Полярного Урала (Белоновская и др., 2016). Под влиянием потепления климата восточная граница распространения широколиственных пород деревьев на южном Урале постепенно сдвигается на восток после того, как она сместилась на запад под воздействием серии экстремально холодных зим в конце 1970-х. Липа имеет преимущества перед дубом, кленом и вязом из-за ее более высокой морозостойкости и способности к вегетативному размножению (Fedorov et al., 2021). На юге округа выявлена экспансия леса в горные степи на фоне увеличения температур и количества осадков в холодный период года. Интенсивное возобновление сосны отмечено в последние 35-40 лет на границе сомкнутых лесов и редколесий, а также в реданах (Гайсин и др., 2020). Нивальный пояс продолжает отступать. Устойчиво сокращаются ледники на Полярном Урале. Последний ледник на Приполярном Урале уже перестал существовать, на его месте образовалось озеро (Глазовский и др., 2005), т.е. активная нивально-гляциальная зона находится на грани исчезновения и будет замещена горной тундрой.

На равнине прогнозируется смещение биомов на север, в том числе отступание лесной зоны на юге и значительное продвижение в тундру (Жильцова, Анисимов, 2015). Ожидается продвижение леса в горные тундры Северного Урала (Sannikov et al., 2018), при этом на Южном Урале прогнозируется смещение границ хвойно-широколиственных и широколиственных биомов к югу (Rumiantsev et al., 2013).

Происходит изменение видового разнообразия и ареалов растений и животных. В Челябинской области за промежуток с 2006 по 2016 гг. отмечено появление новых популяций редких видов растений. В качестве одной из причин указывают изменение климата (Vargot et al., 2016). Районы, которые 40 лет назад характеризовались «лесотундровой» численностью таежных видов грибов, сейчас соответствуют «северотаежным» показателям (Ширяев, Мухин, 2020). В Западной Сибири происходит расширение ареала сплюшки, которая ранее занимала степную и лесостепную зону, а теперь отмечается в таежной. Распространение происходит по долинам рек и останцам горных систем (Митропольский, Мардонова, 2018).

Изменение фенологических дат соответствует общей тенденции. В благоприятных условиях 2020 г. происходило ускоренное развитие природных процессов с опережением средних многолетних дат от 2 до 12 суток (Янцер и др., 2020). Для многих видов растений даты начала цветения в 2003-2016 гг. по сравнению с базовым периодом (1961-1990 гг.) сместились на более ранние сроки на 2-11 дней (Бобрецов и др., 2018). Анализ сроков прилета птиц (22 видов) выявил разный характер их изменений. Одни виды птиц стали прилетать раньше, другие позже, у ряда видов не наблюдалось каких-либо достоверных изменений в сроках прилета. Наиболее сильно даты прилета изменились у дрозда рябинника (на 13 дней раньше) и деревенской ласточки (10 дней). Значительно позже стали прилетать два вида – большой крохаль (на 10 дней) и скворец (семь дней) (Бобрецов и др., 2018).

Уязвимость экосистем к изменению климата связана в первую очередь с лесными пожарами, в меньшей степени – с ветровыми событиями и биогенными факторами. Ожидается умеренный рост данных воздействий (см. главу 2.1.1). Ледники Приполярного Урала находятся на последней стадии деградации, уступая место образующимся озерам (Котляков и др., 2015). Согласно данным дистанционного зондирования за период 1973-2013 гг., в зоне Новоземельско-Ямало-Гыданских арктическо-тундровых биомов в среднем проявляется тенденция роста площади термокарстовых озер, а в зоне Кольско-Большеземельско-Тазовских гипоарктическо-тундровых биомов, наоборот, отмечена тенденция ее сокращения (Полищук и др., 2017). Причем с юга на север число исчезнувших озер в среднем уменьшилось, а вновь образовавшихся – существенно увеличилось (Брыксина, Полищук, 2015).

***Баланс почвенного углерода.*** Суммарный запас углерода на землях, покрытых лесами, в УФО составляет 11,50 ± 2,05 Гт С, из них в слое почвы 0,0-0,3 м запас углерода составил 7,10±1,64 Гт С. Наибольшими запасами углерода характеризуются наиболее заболоченные территории, с преобладанием в почвенном покрове торфяных болотных почв (более 80 кг/м$^2$) (Щепащенко и др., 2013). Запасы общего углерода в органогенной толще подзола в слое 0-10 см составили 32,7 т/га, для органогенных горизонтов торфяно-криозема (0,0-0,4 м) запас углерода составил 299,8 т/га, в торфяно-олиготрофной почве (0,0-0,5 м) – 747,7 т/га (Бобрик и др., 2018; Замолодчиков и др., 2018).

Основываясь на примере оценки дыхания почв в северной части Западной Сибири, можно полагать, что показатели дыхания почв варьируют в зависимости от расположения в ландшафте. Вклад автотрофного дыхания для плоскобугристых торфяников составил 16-30%, для почв сосняков кустарничково-зеленомошных – 60%, для сосняков лишайниковых – 30%. На почвах крупнобугристых торфяников корневое дыхание составило до 60%, для ландшафтов пятнистых тундр показания корневого дыхания варьируют в пределах 15-70% в зависимости от расположения на криогенных формах рельефа. Почвы лесных фитоценозов (подзолы и подбуры) характеризуются широким диапазоном по вкладу автотрофного дыхания: от 0 до 80%. Величина гетеротрофного дыхания варьирует в пределах от 0 до 140 мг $CO_2$ /кг/ч. Значение удельного корневого дыхания находится в пределах 40-500 мг $CO_2$ /кг/ч (Гончарова и др., 2019). В целом углеродный баланс почв УФО положительный, значение величины стока углерода находится в пределах 0,11-0,33 т С на га в год. Балансовая оценка углерода на покрытых лесом землях в сумме составила 22,57±4,77 млн т С в год,

из них 17,66±2,64 млн т С приходится на фитомассу, 1,93±0,61 млн т С на мертвую древесину, 0,73 ± 0,37 млн т С на подстилку, в слое почвы 0-0,3 м – 2,24±1,16 млн т С (Замолодчиков и др., 2018).

Последствия изменения климата выражаются в увеличении продолжительности вегетационного сезона лесной растительности, в связи с чем наблюдается смещение границы лесов вверх по склону гор, в частности, на территории южных районов Урала и Сибири (Замолодчиков, Краев, 2018). Из-за широкого распространения торфяных болот на территории УФО результатом изменения климата является увеличение числа торфяных пожаров, своих наибольших масштабов торфяные пожары достигают в лесной зоне. Как следствие, происходит изменение углеродного баланса почв.

***Водные ресурсы.*** Средние многолетние водные ресурсы УФО составляют 610 км$^3$ в год, их многолетняя динамика характеризуется наличием положительного, статистически значимого линейного тренда. На долю водных ресурсов местного формирования приходится 65% от общих, а на долю притока с сопредельной территории – 35%.

Удельная водообеспеченность территории УФО при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 335 тыс. м$^3$ в год, при местных – 217 тыс. м$^3$ в год, а удельная водообеспеченность населения равна соответственно 51,0 тыс. м$^3$/год и 34,5 тыс. м$^3$/год (очень высокая водообеспеченность). В последние десятилетия произошли очень незначительные изменения удельной водообеспеченности территории и населения УФО общими и местными водными ресурсами.

Водообеспеченность населения в целом в УФО высокая. Однако проблемы водообеспеченности имеют место в Курганской и Челябинской областях. Современная водообеспеченность общими водными ресурсами в этих субъектах характеризуется как низкая – 4,9 и 2,1 тыс. м$^3$/чел. в год соответственно, а местными водными ресурсами – как очень низкая – 0,9 и 1,9 тыс. м$^3$/чел. в год соответственно. Для всех субъектов УФО характерна стабильность в величинах водообеспеченности без каких-либо значимых изменений.

Большая часть территории УФО расположена в бассейне реки Иртыш, нижнего и среднего течения реки Обь. Сток с сопредельной территории поступает по Верхней Оби, а также по реке Иртыш, с территории Казахстана.

В современный период снизился на 10% приток с сопредельной территории в результате уменьшения стока Верхней Оби, а местный сток увеличился на 17%. В целом общие водные ресурсы увеличились на 6%.

Для южной части территории УФО, на реках бассейна Тобола в последние десятилетия отмечается тенденция увеличения максимальных расходов воды, в том числе малой обеспеченности (Георгиевский и др., 2019).

***Сельское хозяйство.*** В регионе наблюдается тенденции к значительному потеплению в северных областях по сравнению с южными областями и более сильному в весенний и осенний периоды (1,3-1,5 °С), чем в летний (0,4-0,5 °С). Показатели теплообеспеченности сельскохозяйственных культур за последние десятилетия в округе росли менее быстрыми темпами по сравнению с ЕТР. Сумма температур за период активной вегетации и за весь

теплый период года увеличилась менее чем на 200 °С повсеместно.

Степень увлажненности территории, оцениваемая индексом сухости за весь сельскохозяйственный год в целом, заметно не изменилась за последние десятилетия. Влагообеспеченность зерновых культур увеличилась, особенно в весенний период вегетации (от 10 до 25% относительно базового периода). Менее благоприятные условия увлажнения наблюдаются в южных районах Челябинской и Курганской областей, где снижается количество зимних и летних осадков.

На УФО в целом приходится порядка 5% производства зерновых и зернобобовых культур в Российской Федерации. Климатически обусловленная урожайность яровых зерновых культур практически не изменилась за последние десятилетия относительно базового периода.

Увеличение теплообеспеченности округа и усиление засушливости южной его части способствуют размножению саранчовых вредителей. В Курганской, Тюменской и Челябинской областях наблюдаются очаги размножения итальянского пруса и нестадных видов саранчовых. Саранчовые вредители выявляются также и в более северной Свердловской области пока в невысокой численности, однако при наблюдаемой тенденции она может возрасти до более значимых размеров. Усилится роль и других насекомых-вредителей сельского хозяйства, для которых благоприятными станут теплые и умеренно влажные условия окружающей среды. Необходимы своевременный мониторинг и проведение агротехнических мероприятий.

***Добывающая промышленность.*** УФО является крупнейшей минерально-сырьевой базой страны, как в отношении твердых полезных ископаемых (Уральская часть УФО), так и в отношении углеводородного сырья (его Западно-Сибирская часть). В Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах разведаны и эксплуатируются нефтяные и газовые месторождения, относящиеся к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в которой сосредоточено 66,7% запасов нефти (6% мировых) и 77,8% газа (26% мировых). На территории округа добываются также уголь, уран, черные и цветные металлы, благородные металлы, нерудное сырье.

Наблюдаемое и ожидаемое в будущем повышение температуры воздуха способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако рост температуры воздуха и уменьшение числа дней с отрицательными температурами обуславливают увеличение пожароопасности в этом регионе, а также сокращение периода использования «зимников» и ледовых морских и речных причалов, что создает дополнительные риски для нефте- и газодобычи. Важным негативным фактором для функционирования транспортной инфраструктуры и добычи углеводородов является деградация многолетнемерзлых пород, нарушающая целостность инфраструктурных объектов. Изменения температурно-влажностного режима усиливают и коррозионную агрессивность атмосферы, сокращающую эксплуатационный ресурс нефтегазового оборудования. Кроме того, более теплая погода провоцирует риски уменьшения добычи газа, т.к. рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива (см. главу 2.3.1).

Изменение климата приводит к росту уровня моря (МГЭИК, 2014). В настоящее время бере-

говая линия полуострова Ямал перемещается в сторону суши со скоростью 4-6 м/год (Калабина, Зворыкина, 2019). Повышающийся уровень моря создает риски более высоких штормовых нагонов, частых наводнений и более интенсивного волнового воздействия на берега. Карский регион, исходя из теории гляциоизостатических движений земной коры, подвергается риску особенно быстрого повышения уровня моря (Баранская и др., 2018).

Добыча железной руды и руд цветных металлов на территории округа ведется как открытым, так и шахтным способом. Шахтная выработка месторождений преобладает в старопромышленных уральских регионах (в основном в Челябинской, Свердловской областях). Комплекс гравитационных процессов (оползней, осыпей, обрушений) на этих территориях в естественных условиях развит по бортам речных долин, на горных склонах, а в техногенных – по бортам действующих и отработанных карьеров. В условиях климатических изменений, в частности, увеличения количества и интенсивности осадков (рис. 3.1.6.4), происходит интенсификация этих процессов, провоцируя риски затопления шахт и подтопления ранее осушенных и благоприятных для хозяйственной деятельности территорий.

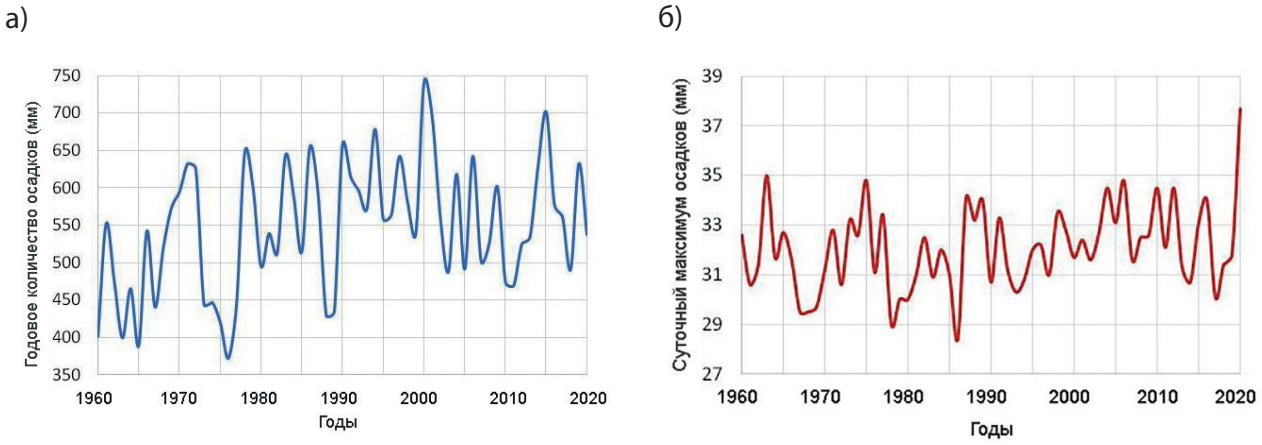



***Рис. 3.1.6.4*** *Изменение режима увлажнения на территории Свердловской области (метеостанция Верхотурье); а) годовое количество осадков, мм; б) суточный максимум осадков, мм*

К середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (Катцов и др., 2020) (рис. 3.1.6.3а, б, г, 3.1.6.6б, в, г).

В этих условиях для обеспечения эффективной и безопасной работы горнодобывающих предприятий необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации. Для защиты подтапливаемых территорий необходимо строительство дренажных сооружений, прочистка открытых водотоков и других элементов естественного дренирования, предупреждение утечек из водонесущих коммуникаций, регулирование стока поверхностных вод, возобновление шахтного и карьерного водоотлива для поддержания уровня подземных вод на проектных отметках.

***Транспорт.*** Уральский регион расположен на важнейших грузонапряженных транспортных

магистралях страны, соединяющих ее Европейскую и Азиатскую части, причем вытянутость района с севера на юг усиливает ее транзитное значение. Особенностью транспортно-логистического комплекса УФО является высокая обеспеченность автомобильными и железнодорожными магистралями южных областей и низкий уровень их развития на севере, прежде всего в Ямало-Ненецком автономном округе, где более 50% добываемых углеводородных ресурсов транспортируются трубопроводным транспортом. С частью труднодоступных малочисленных населенных пунктов полностью отсутствует наземное транспортное сообщение. Неоднородность транспортной освоенности территории районов при общей слабой развитости наземной транспортной инфраструктуры определяет важность воздушного транспорта – коэффициент авиационной подвижности населения в Ямало-Нененцкого автономного округа стабильно превышает среднероссийское значение (Стратегия социально-экономического развития, 2021).

Особенность транспортной системы Ямало-Ненецкого автономного округа – эксплуатация и строительство («Северный широтный ход») самых северных железных дорог страны. Изменения климата, несмотря на самое интенсивное на территории России повышение здесь зимних температур (на полуострове Ямал до 8 °С к середине столетия согласно оценкам (Катцов и др., 2020)), будут оказывать здесь скорее негативное, чем положительное воздействие. Конечно, сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –25 °С приведет к уменьшению простоев в работе и положительно отразится на величине эксплуатационных расходов, но потепление сопровождается здесь, прежде всего, процессами, связанными с деградацией многолетней мерзлоты.

За последние 50 лет южная граница распространения многолетней мерзлоты у подстилающей поверхности сместилась к северу на 30-40 км. В Западной Сибири (территория Уренгойского месторождения) многолетнемерзлые породы на отдельных дренированных водоразделах протаяли до глубины 3-8 м от земной поверхности в полосе шириной около 100 км. Увеличение средней глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлой породы оказывает негативное влияние на устойчивость железнодорожной и автомобильной насыпи и вызывает деформации в опорах системы магистральных трубопроводов, увеличение расходов на ликвидацию ущерба, поддержание и обновление инфраструктурных объектов (линейных объектов, зданий и сооружений транспортно-логистического комплекса).

Для автомобильного транспорта серьезной проблемой станет сокращение продолжительности действия «зимников», уменьшающее транспортную связность территории (за последние 30 лет период эксплуатации таких дорог сократился с 200 до 100 дней в году). Возникает проблема досягаемости удаленных поселков, нефтедобывающих и газодобывающих предприятий, т.к. альтернативный местный воздушный транспорт в этих районах развит недостаточно.

Ожидаемый рост количества зимних атмосферных осадков (рис. 3.1.6.3в) увеличит повторяемость метелей, которые и сейчас характерны для прибрежных районов Ямала и где они могут продолжаться больше суток, блокируя работу наземного и авиационного транспорта.

Для транспортной системы южных районов УФО изменения температурно-влажностного комплекса могут спровоцировать увеличение

повторяемости паводковых наводнений в Тюменской, Свердловской и Курганской областях, интенсивных снегопадов, а также роста опасности экстремальных гололедно-изморозевых отложений, характерных для данного региона.

***Производство и передача энергии.*** На территории УФО находятся около 180 электростанций мощностью более 5 МВт. Наибольшее число электростанций сосредоточено в центральной части округа. ТЭС составляют 93,35% от мощности электростанций региональной энергосистемы, ГЭС – 3,63%, АЭС – 2,9%. Наиболее крупными ГРЭС являются Рефтинская (Свердловская область) и Сургутская (Ханты-Мансийский автономный округ). В Свердловской области также расположена Белоярская АЭС. Рост максимальных температур воздуха и числа дней с жаркой погодой в центре и на юге округа (рис. 3.1.6.5) обусловливает риски нарушения нормальной работы систем охлаждения энергоблоков, что может привести к снижению выработки электроэнергии вплоть до остановки электростанций в периоды длительной аномально жаркой погоды (см. главу 2.3.5). Кроме того, значительную угрозу для работы ТЭС и АЭС представляют участившиеся опасные погодные явления (сверхнормативные гололедно-ветровые нагрузки, смерчи, пожароопасные условия). В результате их воздействия могут возникнуть аварийные ситуации на ЛЭП и нарушиться внешнее энергоснабжение электростанций. Изменение ветрового режима, выражающееся, в частности, в увеличении повторяемости штилей, может привести к накоплению радиоактивных веществ в ближайшем окружении АЭС.

а) б)

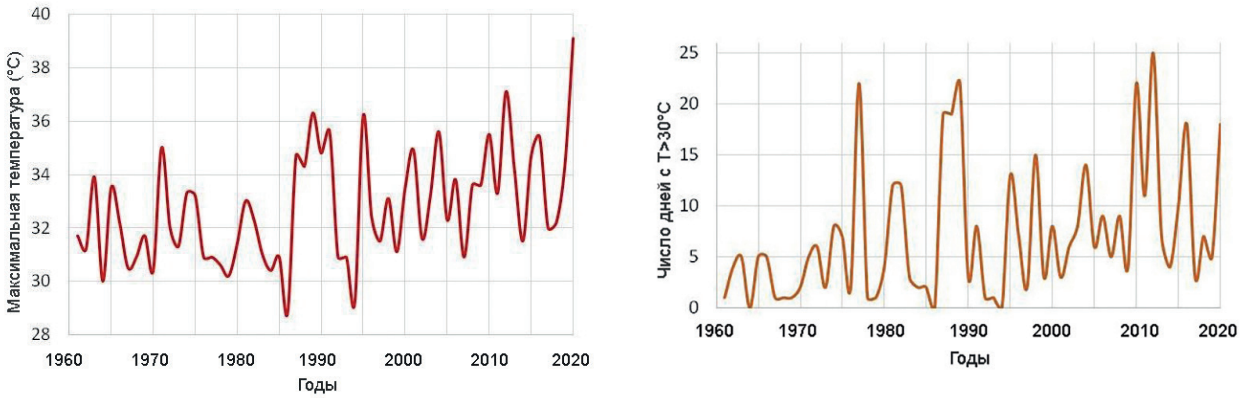



***Рис. 3.1.6.5*** *а) максимальная температура воздуха (°C); б) число дней с температурой воздуха выше 30 °C. Екатеринбург*

Прогнозные оценки (Катцов и др., 2020) показывают, что к середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций (рис. 3.1.6.6е). Для снижения уязвимости объектов энергетики округа необходимо обеспечить дополнительные возможности для охлаждения рабочих блоков электростанций, провести модернизацию ЛЭП в соответствии с изменяющимися климатическими условиями, а также сделать более надежной работу очистительных систем, чтобы свести к минимуму возможное загрязнение воздуха.

В УФО альтернативная энергетика в настоящее время существует на уровне экспериментальных проектов. Однако имеется необходимость ее развития, особенно в децентрализованном секторе энергоснабжения, который занимает

значительную северо-восточную часть округа. По уровню развития альтернативной энергетики УФО значительно уступает СФО и ДФО. Так, например, в УФО при огромной доле природоемких отраслей в экономике и высоком уровне антропогенного загрязнения, доля альтернативной энергетики в общем энергобалансе в 50 раз меньше, чем в ДФО. Общий объем выбросов парниковых газов от деятельности традиционной электроэнергетики, определенный с помощью методики МГЭИК, в УФО составил 73,91 млн тонн $CO_2$-экв. При замещении энергетики на ископаемом топливе альтернативными источниками можно не только решать энергетические проблемы в удаленных регионах из-за недостатка инфраструктуры, но и значительно понизить уровень негативного антропогенного воздействия на окружающую среду (Двинин, 2019).

В Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах, а также в Тюменской области наличие больших запасов нефти и природного газа оказало негативное влияние на темпы развития альтернативной энергетики. В Тюменской области практически отсутствуют крупные объекты, которые можно отнести к альтернативной энергетике. В Ямало-Ненецком автономном округе, обладающем очень высоким ветровым потенциалом (на Ямале он превышает 700 Вт/м$^2$), для устранения энергодефицита региона существует проект строительства 11 ветряных электростанций, однако в настоящее время реализована лишь одна ВЭУ с ежегодной выработкой электроэнергии в 0,54 млн кВт•ч и мощностью 0,25 МВт. Другим значимым проектом ВИЭ является использование ветро-солнечных генераторов на газовых промыслах.

Свердловская область является регионом, где сконцентрирован ряд весьма значимых для энергетики страны энергообъектов. При этом данный регион обладает существенным техническим и экономическим потенциалом для развития возобновляемой энергетики (Шеклеин, Велькин, 2012), особенно малой гидроэнергетики, поскольку в области есть большая сеть малых рек и система водохранилищ. В северной и горной частях территории области имеются зоны с хорошей ветровой обеспеченностью, где средние годовые скорости ветра находятся на уровне 5-10 м/с, что позволяет рассматривать возможность сооружения ветряных электростанций.

Южные районы Свердловской и Тюменской областей, Челябинская и Курганская области обладают достаточно большими солнечными ресурсами. Годовая продолжительность солнечного сияния в этих регионах не менее 1900 часов, годовой приход солнечной радиации 1000-1100 кВт•ч/м$^2$.

На сегодняшний день потенциал ветровых и солнечных ресурсов УФО не реализован. В Челябинской области планируется к введению солнечная электростанция мощностью 244 кВт. В Курганской области существует проект строительства относительно крупной Шумихинской ветроэлектростанции, мощностью до 50 МВт, однако проект пока не реализован.

Согласно СП «Нагрузки и воздействия» (2016), гололедные нагрузки на территории всего округа в основном незначительны (большая часть округа отнесена ко II и III районам). В горных районах выделяется IV и V (особо опасный) районы, где большая гололедная нагрузка может приводить к аварийным отключениям на электросетях.

Грозовая деятельность на большей части округа

не превышает в среднем 60 часов в год, а в некоторых районах имеет тенденцию к уменьшению. Ежегодно во всем УФО наблюдаются явления, связанные с ветром, гололедно-изморозевыми отложениями и грозами, которые наносят ущерб. Причем наибольшее число неблагоприятных явлений связано именно с ветром. Определенной тенденции к увеличению числа случаев с этими явлениями не существует, однако для бесперебойной эксплуатации ЛЭП необходим постоянный контроль за возникающими метеорологическими нагрузками вдоль высоковольтных линий, а также необходимо уточнять климатические параметры в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных последних лет по репрезентативным метеостанциям.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Изменения климата оказывают значительное влияние на условия функционирования ЖКХ в УФО. В зимний сезон на территории округа ожидается существенное повышение средней температуры отопительного периода, которое к середине XXI века на севере Ямало-Ненецкого автономного округа составит около 5 °С (рис. 3.1.6.6в). При этом величина градусосуток отопительного периода на территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов уменьшится на 15-18% по отношению к концу XX века (рис. 3.1.6.6г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления в холодный период года и делают актуальным проведение адекватной технологической модернизации систем теплоснабжения.

В то же время в южных районах УФО (в Челябинской, Курганской, Екатеринбургской и Тюменской областях) в зимний сезон ожидается усиление негативной тенденции, которая ярко проявляется в западных районах страны. Здесь отмечается ускоренное старение и уменьшение долговечности ограждающих конструкций зданий, обусловленное повышением температуры зимнего сезона и ростом числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 3.1.6.6б). Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Изменение режима атмосферных осадков на территории округа негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.6.7а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции, в холодный сезон (рис. 3.1.6.7б, в) будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Рост экстремальности осадков на территории УФО будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.6.7в, г). Такие изменения в южных районах округа могут привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

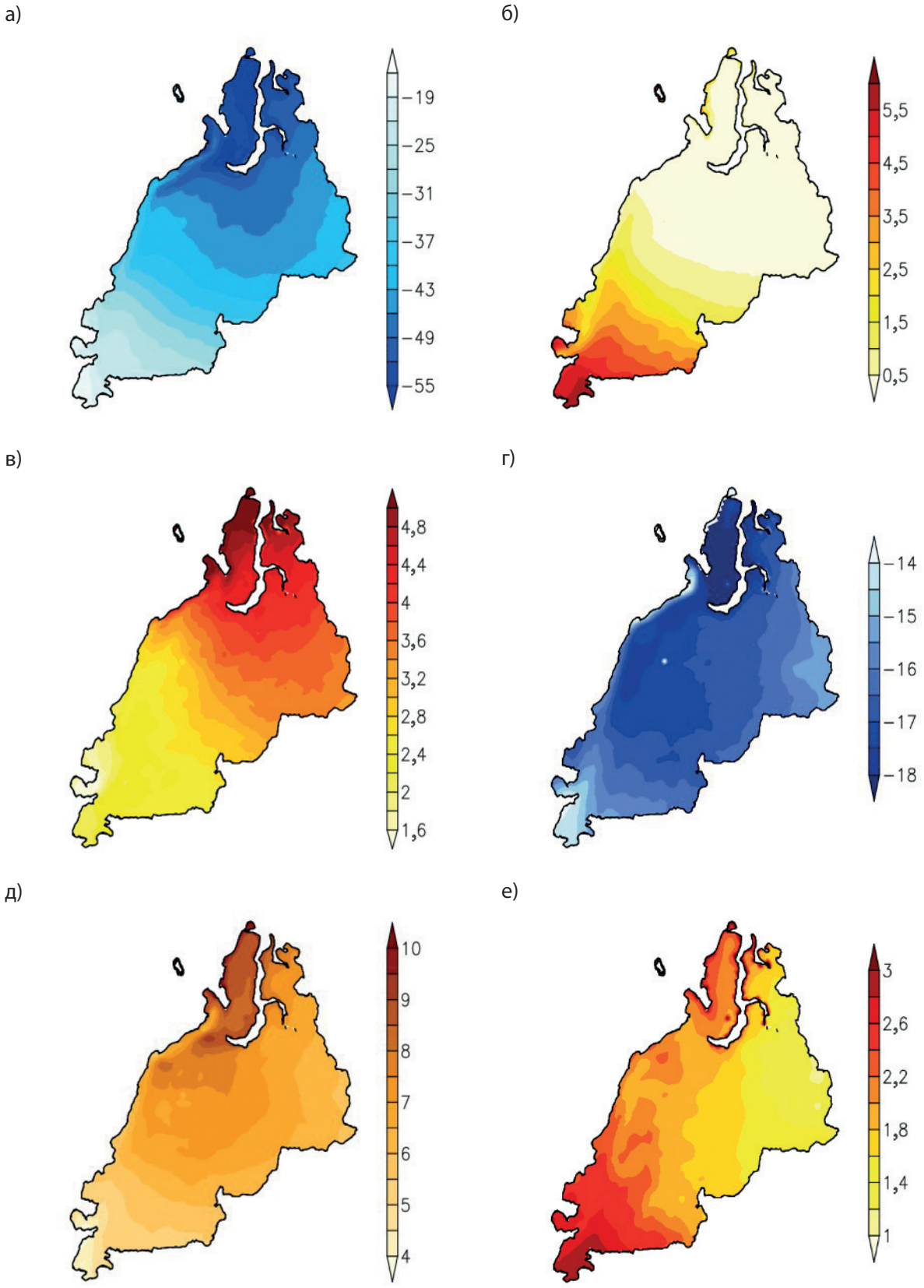



***Рис. 3.1.6.6*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории УФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (дни); б) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); в) средняя температура отопительного периода (°С); г) градусо-сутки отопительного периода (%); д) температура наиболее холодной пятидневки (°С); е) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С (рис. 3.1.6.6а) и увеличение продолжительности теплого сезона создадут более благоприятные условия для проведения работ и уменьшат время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

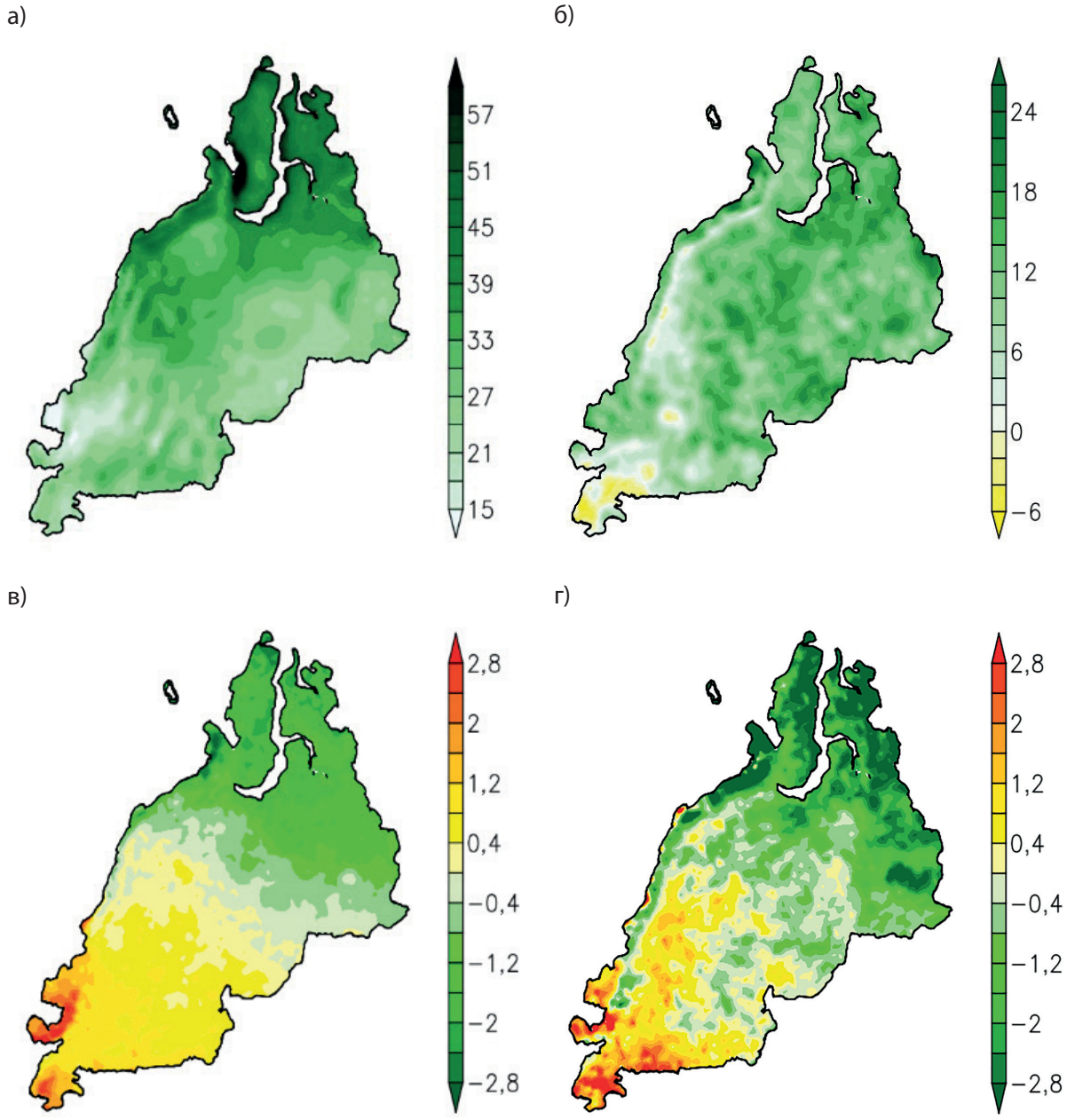



***Рис. 3.1.6.7*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории УФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сутки для теплого сезона (дни); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сутки для теплого сезона (дни). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 3.1.6.6д, е). Специальное внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

***Туризм.*** В состав УФО входят Западно-Сибирский равнинный туристический район, расположенный на севере Тюменской области, и Уральский (Пермская, Свердловская и Челябинская области). Туризм на Урале активно развивается и представлен разнообразными формами: пешеходным, лыжным, водным, конным. Этому способствует, прежде всего, ландшафт региона, который подразделяется на средневысотный Северный Урал, низкогорный Средний Урал и среднегорный Южный Урал, и каждый из них формирует свой туристический кластер – альпинизм, спелеология, горнолыжный спорт и т.д. В пределах округа возможны туристские походы: пешие, лыжные, водные, спелеопоходы. По Курганской области проходит маршрут «Конный по Зауралью». Среди туристов-водников популярны сплавы по рекам Юрюзань, Сосьва, Пышма, Сылва, Тура. В пределах Пермского края, Свердловской и Челябинской областей, где расположены большие по площади особо-охраняемые природные территории, такие как заповедники, заказники, национальные парки, активно развивается «экологический» туризм. В округе прекрасные природные условия для лечебно-оздоровительного отдыха (естественные горячие пары и сухие газы углекисло-кислородного, азотно-кислородного составов), но наиболее развиваемое и перспективное направление в настоящее время – горнолыжные виды спорта.

Климат большей части территории резко-континентальный. Тепловой комфортный период для летних видов отдыха и туризма на севере отсутствует, а на юге Челябинской области продолжается до 150 дней. Продолжительность благоприятного периода для летнего отдыха и туризма колеблется от нескольких дней на севере до 120 на юге. Высота снежного покрова меняется от 80 до 50 см к югу, а продолжительность его залегания – от 205 до 170 дней.

В самый холодный период (декабрь – февраль) здесь преобладают умеренно морозные и значительно морозные погоды (75%). Рекреационное использование горных районов на высотах свыше 1000 м в зимний период осложняется сильными метелями, когда скорость ветров достигает 40 м/с. В южной части округа зауральские территории характеризуются малоснежными зимами (30-40 см с продолжительностью залегания 140-160 дней) и сильными метелями. Лето здесь жаркое и сухое, в отличие от более северных и горных частей региона.

Для большей части территории Урала в настоящее время характерно суммарное повышение температуры воздуха как летом, так и зимой (рис. 3.1.6.3а, б), что благоприятно скажется на развитии указанных ранее видов рекреации. Прогноз на середину века подтверждает эту тенденцию.

Негативные факторы для рекреации, связанные с потеплением климата, ассоциируются прежде всего с увеличением риска инфицированности и заболеваемости отдыхающих в регионе трансмиссивными заболеваниями, переноси-

мыми клещами (крымской геморрагической лихорадкой, клещевым энцефалитом) и аридизацией климата в результате роста испарения и уменьшения осадков в теплый период года на юге Тюменской, в Челябинской и Курганской областях, что приведет к утрате ландшафтной привлекательности в этих регионах в летнее время года и, следовательно, к уменьшению туристического потока.

***Направления адаптации.*** Приоритетным направлением адаптации экосистем в УФО являются меры по борьбе с пожарами во всех биомах, от степных до тундровых. Целесообразно снижение и снятие антропогенной нагрузки, в том числе через создание и расширение существующих особо охраняемых природных территорий для формирования экологических коридоров и климатических убежищ. Также важно уделять внимание минимизации нарушений горных склонов для снижения эрозии и поддержанию целостности растительного покрова в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Адаптационные мероприятия в УФО требуются для снижения ущербов от наводнений, которые являются основным фактором негативного воздействия вод в бассейнах Тобола, Туры и Иртыша. В соответствии со схемами комплексного использования и охраны водных объектов основных бассейнов УФО такие мероприятия включают в себя строительство защитных сооружений и дамб обвалования, организационные мероприятия по безаварийному пропуску половодий и паводков на водосбросных сооружениях водохранилищных гидроузлов. Учитывая значительную заболоченность территории УФО, целесообразными являются мероприятия по охране и защите водно-болотных угодий, в том числе восстановление осушенных болотных экосистем путем их вторичного обводнения. Помимо этого, в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений (ЯНАО) требуется развитие региональных, ведомственных и корпоративных программ гидрологического мониторинга с целью повышения надежности гидрологического обоснования водохозяйственных мероприятий и обеспечения безопасности эксплуатации месторождений и трубопроводов.

Адаптация сельского хозяйства к изменению климата в этом регионе может заключаться в расширении посевных площадей озимых зерновых культур (пшеницы, ржи и ячменя) как более урожайных. Увеличение теплообеспеченности округа и усиление засушливости южной его части способствует размножению саранчовых вредителей. Необходим своевременный мониторинг и проведение агротехнических мероприятий.

В горнодобывающей отрасли для защиты подтапливаемых территорий необходимо строительство дренажных сооружений, прочистка открытых водотоков и других элементов естественного дренирования, предупреждение утечек из водонесущих коммуникаций, регулирование стока поверхностных вод, возобновление шахтного и карьерного водоотлива для поддержания уровня подземных вод на проектных отметках.

Для транспортной инфраструктуры необходим мониторинг состояния автомобильных дорог общего пользования, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны. Приведение в нормативное состояние искусственных сооружений на дорогах, находящихся в зоне потенциального подтопления.

Для снижения уязвимости объектов энергетики округа необходимо обеспечить дополнительные возможности для охлаждения рабочих блоков электростанций, провести модернизацию ЛЭП в соответствии с изменяющимися климатическими условиями, а также сделать более надежной работу очистительных систем, чтобы свести к минимуму возможное загрязнение воздуха. Целесообразно развитие ВИЭ, особенно в децентрализованном секторе энергоснабжения, который занимает значительную северо-восточную часть округа.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства специальное внимание должно быть уделено мониторингу эволюции многолетнемерзлых грунтов в регионе. Для уменьшения ущерба, связанного с высокими геокриологическими рисками на территории ЯНАО и в других районах УФО, необходимо изменение норм строительного проектирования с учетом ослабления несущей способности многолетнемерзлых грунтов, а также применение инженерных мер адаптации существующей инфраструктуры. В южных районах УФО для уменьшения влияния температурно-влажностных деформаций на ускоренное старение зданий важно обеспечить при строительстве новых объектов использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания и повышенную коррозийную устойчивость различных элементов, а также конструктивные решения, исключающие повышение влагосодержания строительных конструкций за счет атмосферных воздействий. В связи с ростом экстремальности осадков на всей территории округа приобретает актуальность модернизация систем водоотведения на основе обновленных нормативов интенсивности осадков. В южных районах, в связи с увеличением продолжительности периодов с дефицитом осадков при высоких летних температурах, желательно принятие превентивных мер, направленных на повышение эффективности водопотребления. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

Для развития летних видов рекреации необходимо усиление эпидемиологического контроля в туристских районах региона.

## 3.1.7 Сибирский федеральный округ (СФО)

### 3.1.7.1 Изменения климата на территории СФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории СФО (рис. 3.1.7.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха в Хатанге возросла примерно на 3 °С, в Иркутске на 2,5 °С, в Новосибирске на 2 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Осадки возрастали в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества это существенно не отразилось на изменении годовых сумм (рис. 3.1.7.1б).

а) б)

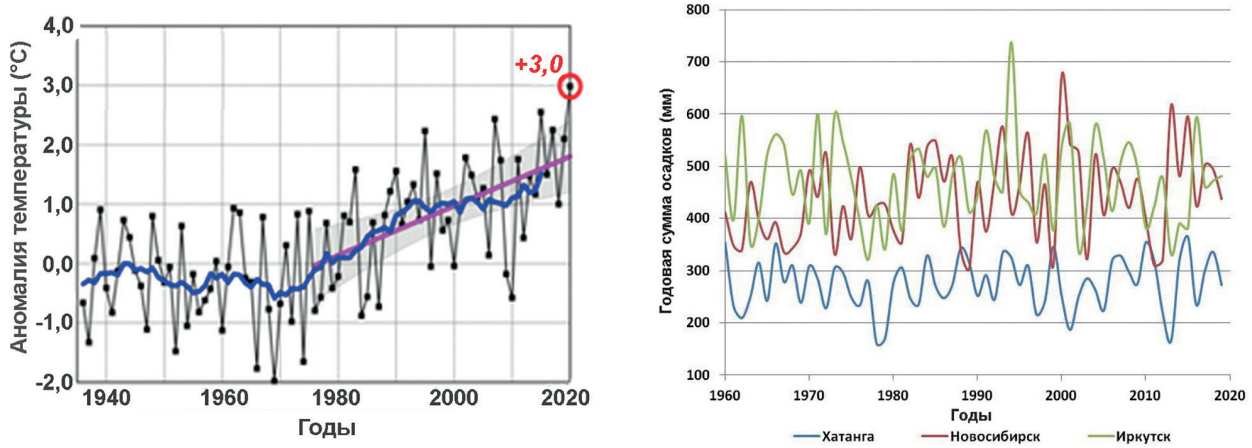



***Рис. 3.1.7.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории СФО, °С, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм. Хатанга, Новосибирск, Иркутск.1960-2020 гг.*

В последнее тридцатилетие на территории СФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, наводнениями, экстремальными температурами (рис. 3.1.7.2).

а) б)

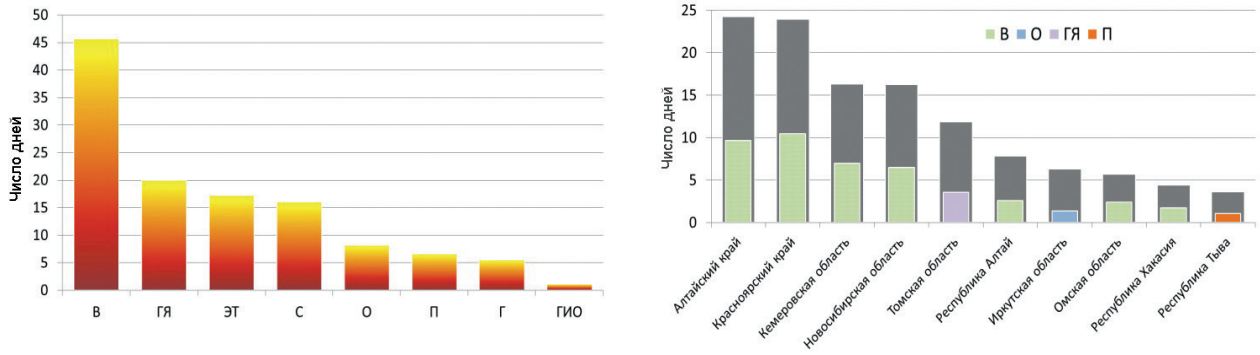



***Рис. 3.1.7.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории СФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов СФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data); В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.7.3) на большей части СФО возможно повышение температуры воздуха летнего се-

зона на 1-1,5 °С, а на юге – на 2-3 °С (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом на севере и в центре округа могут возрасти на 10-20%, а на юге – уменьшиться на 5-10%. Зимой в северной и центральной частях СФО возможен рост температуры воздуха на 5-8 °С, в южной части – на 3-5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20-40%, а на побережье Северного Ледовитого океана – 50-80%.

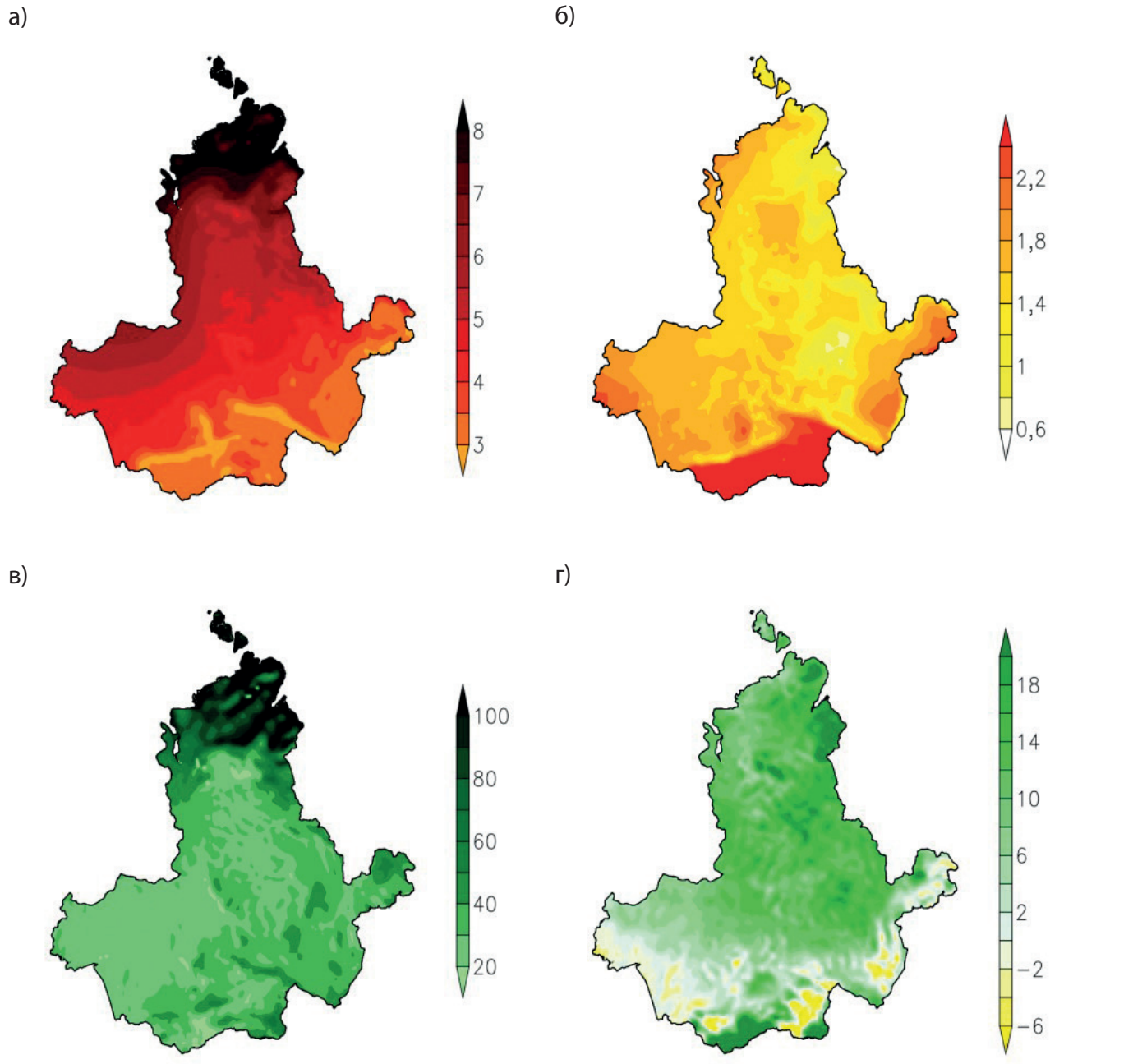



***Рис. 3.1.7.3*** *Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории СФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.7.2 Природные системы и экономика СФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** СФО занимает территорию в равнинной части бассейна Енисея, где полно выражен зональный ряд от тундр, бореальной тайги (северо-, средне- и южнотаежные биомы) до лесостепи и Кулундинской степи. Значительная часть округа имеет горный рельеф, включая гипоарктические горы Таймыра, Путорано-Анабарского плато, а также горы Южной Сибири со сложным высотно-поясным спектром экосистем.

Хотя на востоке Таймыра за последние три десятилетия существенных изменений границы леса не наблюдалось, имело место массовое возобновление лиственницы на некоторых открытых участках, например, по краям пересохших озер (Pospelova et al., 2017). На плато Путорана сравнение современной верхней границы леса с топографическими картами 1956 г. показало продвижение верхней границы леса от 59 ± ± 56 м для северных склонов до 111 ± 74 м для южных. При исключении участков с заметно выраженным воздействием неклиматических факторов средняя скорость поднятия верхнего предела лесов увеличивается с 1,0 м/год до 1,4 м/год (Григорьев и др., 2019).

Сопоставлением данных дистанционного зондирования 2000 и 2014 гг. выявлено расширение лесных островов на востоке Таймыра (Ары-Мас и реке Белая) (Белоновская и др., 2016). Скорость продвижения лиственницы в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау оценивается величиной 1 м/10 лет, сосны сибирской кедровой в лесотундре Западного Саяна – 2 м/10 лет (Петров, 2016). Появились новые свидетельства продвижения деревьев в горные тундры и степи, интенсивного воспроизводства и повышения продуктивности древостоев в последние 30-100 лет на Русском Алтае (Kharuk et al., 2017; Gatti et al., 2019) и в горах Путорана (Pospelova et al., 2017; Grigor'ev et al., 2019). Граница распространения лесов из лиственницы активно продвигается на север и отступает на юге в связи с нарастающей аридизацией (Pospelova et al., 2017). Изменение климата и режим пожаров смещают экотон южной тайги в Туве к северу (Brazhnik et al., 2017). Современное оледенение Русского Алтая находится на стадии активной деградации (Торопов и др., 2020).

В Южной Сибири ожидается, что степной биом увеличит площадь за счет таежного биома, лесостепь будет замещена степью на нижней границе леса (Brazhnik, Shugart, 2015). Деградация мерзлоты будет способствовать существенной перестройке ландшафтов с заменой в конечном итоге на более продуктивные (Жильцова, Анисимов, 2015). На Таймыре отмечен рост разнообразия растений, температурные аномалии способствуют проникновению бореальных видов на север (Тишков и др., 2020).

Значимые изменения происходят в видовом составе фауны. Например, со второй половины XX века видовой состав куликов в котловине озера Байкал увеличился с 45 до 57 видов, что сопровождается одновременным ростом численности. Изменение является следствием расселения к северу ряда типично южных видов куликов (Мельников, 2019).

Виды таежной фауны встречаются во все более северных регионах, в том числе бурый медведь (Pospelova et al., 2017). Отмечается сокращение численности популяций горных видов птиц, таких как тундряная куропатка, краснобрюхая горихвостка, альпийская завирушка и др.,

что связано с уменьшением площади горно-тундровых местообитаний из-за распространения древесно-кустарниковой растительности на большие высоты (Баранов, Воронина, 2016). Енисейский зоогеографический барьер перестает быть непроницаемым: появилась возможность многим европейским видам птиц быстро распространяться как к востоку, так и к северу по измененным человекам ландшафтам, а представителям монгольского типа фауны – в северном направлении (Баранов, Воронина, 2016).

С начала XXI века площадь озера Чаны, расположенного в зоне Тоболо-Приобских лесостепных биомов, в среднем увеличилась на 18% относительно периода 1971-2000 гг. за счет большего темпа роста количества осадков на 4% в сравнении с величиной испарения (Kondakova et al., 2020), а рост уровня воды привел к снижению минерализации и увеличению видового разнообразия водной флоры и фауны (Bezmaternykh, 2016).

Изменение фенологических дат соответствует общим трендам. У ряда видов сосудистых растений даты начала цветения в 1998-2018 гг. сместились на более ранние сроки. Интервал в смещениях составляет от одного до 14 дней. Значительно раньше стали зацветать хохлатка крупноприцветниковая – на 17 дней, карагана древовидная – на 14 дней, и черемуха обыкновенная – на 13 дней (Лукашева, 2020). Отмечается более раннее начало сокодвижения у березы (на восемь дней). В среднем на четыре дня раньше стало слышно первое кукование обыкновенной кукушки. Также на четыре дня раньше стал встречаться первый муравей и делать свой первый облет шмель (Лукашева, 2020).

Изменились сроки миграции северных оленей. Анализ начала прилета птиц (10 видов) за последние 20 лет выявил также опережающую тенденцию в изменениях их сроков: 30% исследуемых видов стали прилетать раньше. Наиболее сильно даты прилета сместились у желтоголовой трясогузки (25 дней) и береговой ласточки (22 дня) (Лукашева, 2020).

В горной тундре Алтае-Саянского региона происходит увеличение радиального прироста сосны сибирской (35-140%), лиственницы сибирской (35%), пихты сибирской (60-210%) (Петров, 2016).

На фоне потепления климата наибольшие продвижение по градиенту высоты и увеличение проективного покрытия наблюдаются у кустарников, за ними следуют лиственница, кедр и пихта. В зонах достаточного увлажнения (высокогорья) потепление стимулирует возрастание радиального прироста и способствует миграции древесных растений в горную лесотундру (Петров и др., 2021).

Ожидаются дальнейшие усиление ветрового воздействия, умеренный рост воздействия пожаров, которые уже сейчас ежегодно охватывают значительные площади, биогенных факторов. Уязвимость экосистем к изменению климата в СФО связана с таянием мерзлоты, наводнениями, летними ветровыми событиями (на юге, кроме того, с засухами), с биогенными факторами и с лесными пожарами. Экосистемы на мерзлоте становятся особо уязвимыми и быстро деградируют при малейшем нарушении растительного покрова. На динамику видового состава гидробионтов также влияет изменение режима стока рек, выраженное в их способности справиться с величиной и продолжительностью наводнений и засушливых периодов (см. главу 2.1.1).

К настоящему времени сокращение площади ледников Бырранга превысило 20-25%. Сокра-

щение площади оледенения Катунского хребта за 1968-2008 гг. составило почти 50 км$^2$, для Южно-Чуйского – 34 км$^2$, Северо-Чуйского – более 22 км$^2$ (Торопов и др., 2020). Ледники Кузнецкого Алатау сократились на 25-57% по сравнению с 1975 г. (Котляков и др., 2015). Отмечается увеличение скорости сокращения площади ледников Катунского хребта почти в 1,5 раза после 2008 г. по сравнению с периодом 1968-2008 гг. (Котляков и др., 2015). Общее сокращение площади оледенения составило за 20 лет 25,8%. Диапазон уменьшения площади в относительных величинах с 2000 до 2021 года колеблется от 0 до 95% (Ананичева и др., 2019).

В нивальных биомах на Алтае (горноледниковый бассейн реки Актру) за период 1996-2012 гг. речной сток увеличился на 16% (Галахов и др., 2019). К концу XXI века ожидается увеличение ледникового стока на Алтае на 30% по сравнению с периодом 1986-2005 гг. при жестком сценарии изменений климата RCP8.5 и наоборот – уменьшение стока на 39% при более мягком сценарии RCP4.5 (Zhang et al., 2016).

Маловодный период 1996-2017 гг. на Байкале привел к повышению температуры прибрежных вод озера и снижению численности мелководных популяций омуля, когда рыбы избегали перегретого мелководья, находя богатую кормовую базу в глубоководных районах (Смирнов и др., 2015). Увеличение температуры воды особенно опасно для холодноводных рыб и беспозвоночных, и, наоборот, ареалы распространения видов, предпочитающих более теплую воду, в будущем будут расширяться (см. главу 2.1.1).

***Баланс почвенного углерода.*** Благодаря значительной площади (около 25% всей территории Российской Федерации) и лесистости (свыше 51%), СФО лидирует по вкладу в национальный запас углерода лесных биомов, на верхние 30 см почвенного звена которых приходится около 30 Гт С (Замолодчиков и др., 2018). Для т.н. Енисейского меридиана, пересекающего несколько природных зон СФО, удельные запасы детрита и гумуса почв для горизонтов 0-20 и 0-50 см, соответственно, оцениваются диапазонами 10-30 и 100-120 т/га (Ваганов и др., 2005). В расчетах углеродных балансов для нарушаемых и восстанавливаемых лесных и кустарниковых экосистем СФО приняты удельные почвенные запасы углерода на уровне 90-130 и 130-160 т/га, соответственно (Методические указания, 2017). Рекордно высокие запасы органического вещества – от 400 до 2000 т/га по углероду – закономерно приурочены к лесо- и тундрово-болотным комплексам (Национальный атлас почв, 2011; Головацкая, Никонова, 2013), тогда как горные (около 40% площади СФО), арктотундровые, а также различные типы лесостепных и степных почв округа демонстрируют значительное варьирование запасов углерода в диапазоне от очень низких (менее 40 т/га в метровой толще горных, арктических и некоторых разновидностей тундровых почв) до средних и высоких (200-300 т/га в черноземах).

Величина дыхания почв СФО достигает в средней тайге 3-8 т С/га/год (Махныкина и др., 2020), в Арктической зоне обычно не превышает 2 т С/га, в долинах рек – до 4,5 т С/га/год и более (Национальный атлас Арктики, 2017); в южных регионах округа – до 2 т С/га/год (Робертус и др., 2014). Для лесных биомов Красноярского края, играющих важнейшую роль в углеродном бюджете экосистем СФО, суммарный ежегодный возврат углерода в атмосферу посредством автотрофного и гетеротрофного дыхания почв оценивается величиной на уровне 200 млн т, что составляет более 95% расходной части баланса данного элемента (Ведрова, Ваганов, 2009).

Природное разнообразие и условия использования экосистем округа определяют разнонаправленность соотношений между природными и расходными составляющими баланса углерода в их почвенном звене. Устойчивое накопление углерода в многолетнем цикле фиксируется для северо- и среднетаежных лесов, а также ненарушенных болот независимо от их зональной приуроченности, тогда как южнотаежные леса характеризуются близким к равновесному соотношением продукционных и деструкционных процессов, а притундровые могут даже терять углерод в связи с деградацией многолетней мерзлоты (Ведрова, Ваганов, 2009; Головацкая, Никонова, 2013). Результирующий баланс почвенного углерода для всех лесов СФО – положительный и составляет в абсолютных значениях около 18 млн т С/год при расчетном слое 0-30 см. Баланс почвенного углерода в СФО самый большой среди федеральных округов России (Замолодчиков и др., 2018). Вместе с тем, по осредненным на единицу площади показателям стока углерода в лесах, округ занимает одно из последних мест по причине высокой повторяемости и широкого распространения лесных пожаров, затрагивающих не только живую фитомассу, но и органогенные горизонты почв. За пределами лесной зоны почвы теряют углерод, но по разным причинам: в тундрах это связано с деградацией многолетней мерзлоты, увеличением температуры почвы и скорости разложения ранее накопленного почвой органического вещества, а в лесостепях и степях – главным образом, с землепользованием (Самбуу и др., 2009; Помазкина и др., 2016; Чупрова, 2017).

Ожидаемые климатические изменения, по-видимому, еще более усилят наблюдаемые различия в углеродном балансе почв СФО. В частности, для ненарушенных торфяных болот округа прогнозируется устойчивое увеличение скорости накопления углерода (Дюкарев, Головацкая, 2008); почвенный покров большинства вариантов лесных биомов также ожидает приток растительных остатков, что может, при определенных условиях, способствовать устойчивому закреплению углерода в почвенном гумусе. Для тундровых почв, напротив, сохраняющаяся неопределенность прогноза углеродного бюджета обусловлена наложением роста фитопродуктивности сообществ и других эффектов т.н. «позеленения» тундры (Тишков и др., 2018) на одновременное усиление процессов минерализации ранее накопленного почвами и оттаивающими почвообразующими породами органического вещества. Устойчивый отрицательный баланс углерода почв лесостепных и степных биомов СФО обусловлен, главным образом, длительным и нерациональным освоением, практика которого будет и дальше определять параметры органопрофиля почв агроценозов вне зависимости от климатических изменений; при этом ненарушенные степные биомы рассматриваются как накопители углерода, сопоставимые по значимости с некоторыми типами лесов (Чебакова и др., 2014).

***Водные ресурсы.*** Основной составляющей водных ресурсов СФО (площадь 4361727 км$^2$, население 17003927 чел. на 2021 г.), равных 1320 км$^3$ в год, является сток крупнейшей реки Российской Федерации – Енисея, бассейн которого практически полностью расположен в пределах рассматриваемой территории. Здесь также расположены бассейны Верхней Оби, Верхней Лены, Верхнего Иртыша, Нижнего Витима, а также ряда рек Арктического региона. Около 14% от общих водных ресурсов округа поступает с сопредельной территории. В целом при современных климатических условиях водные ресурсы округа, удельная во-

дообеспеченность территории и населения стали незначительно выше, чем в 1936-1977 гг. СФО с плотностью населения 3,9 чел/км$^2$ имеет очень высокую водообеспеченность, которая за период с 1980 г. повышается в большинстве субъектов. Однако в СФО водообеспеченность местными водными ресурсами в двух субъектах – Новосибирской и Омской областях – составляет 2,0 и 3,2 тыс. м$^3$/чел. в год, что является очень низкой и низкой соответственно (Балонишникова, 2021).

Крупнейшими реками, протекающими по территории СФО, являются Енисей, Ангара, Витим, Лена, Обь, Иртыш. Сток рек Енисей и Витим в 1978-2020 гг. был соответственно на 7 и 21% выше, чем в предшествующий период, при этом возросла его дисперсия. Сток реки Обь, наоборот, был на 14% ниже, а его дисперсия существенно уменьшилась. Снижение годового стока произошло и на реке Ангара (на 2%).

На реках, расположенных в верхней части бассейнов Ангары и Иртыша, возросли риски опасных дождевых паводков (Георгиевский и др., 2019). Примером этих опасных гидрологических явлений являются наводнения на реках бассейна Верхней Ангары, произошедшие в 2019 г. (Георгиевский и др., 2020).

***Сельское хозяйство.*** Самые заметные последствия изменений температурного режима в регионе связаны со значительным потеплением в весенний сезон (1,7-2,0 °С). Более умеренно потепление проявляется в летний сезон в центральных и южных областях (0,2-0,4 °С). Сумма активных температур за период активной вегетации сельскохозяйственных культур повышается, но не такими быстрыми темпами, как на ЕТР. Скорость роста этого показателя составляет от 40 °С до 70 °С за 10 лет. Наблюдается рост продолжительности периода вегетации, не превышающий двух–трех суток за десятилетие.

В весенне-летний период наблюдается положительная тенденция к увеличению количества осадков. В некоторых областях в 2005-2016 гг. сумма осадков за весенний период увеличилась на 15-20% по сравнению с базовым периодом 1961-1990 гг. При наблюдаемом росте зимних осадков можно ожидать увеличения накопленной за зиму массы снега и ускорения ее таяния весной.

Посевные площади зерновых культур в СФО составляют более 20% площадей по России в целом. В результате изменения агроклиматических ресурсов колебания климатически обусловленной урожайности зерновых культур за последние десятилетия не были значительными и не превышали 5-10%.

В основных зерновых регионах не выявлено значимого понижения урожайности, связанного с долговременными изменениями температурного и влажностного режимов. Напротив, в отдельных районах Новосибирской и Челябинской областей и в Алтайском крае климатически обусловленная урожайность повысилась за период потепления.

Потепление климата, которое в Западной и Восточной Сибири не сопровождается ростом засушливости, создает благоприятные условия для развития сельского хозяйства и ведет к повышению его продуктивности за счет более широкого внедрения позднеспелых культур, сортов и гибридов. Потепление климата может способствовать укреплению кормовой базы животноводства за счет многоукосных трав и пожнивных посевов.

На территории СФО в последние годы регистрируется повышенная численность нестадных саранчовых вредителей – преимущественно в Республике Хакасия. В Новосибирской и Омской областях отмечены очаги размножения итальянского пруса, который при благоприятных погодных условиях может проникнуть и в другие области округа. Отмечается присутствие саранчовых также в Кемеровской и Иркутской областях, в Красноярском и Алтайском краях, Республиках Тыва и Алтай. Из-за увеличения суммы эффективных температур возможны продвижение колорадского жука в более северные регионы и увеличение количества его генераций в южной части округа. В СФО также зафиксированы высокий рост численности и увеличение площади заселения для лугового мотылька, в отдельных регионах СФО наблюдалось массовое появление капустной моли на посевах рапса.

***Добывающая промышленность.*** СФО обладает крупным ресурсным потенциалом, прежде всего твердых полезных ископаемых. Здесь сосредоточены основные запасы твердого топлива (угля, урана), металлических полезных ископаемых, нерудного сырья.

Изменение климата в этом регионе выражается в росте температуры воздуха практически на всей территории округа (рис. 3.1.7.4), в увеличении мощности сезонноталого слоя многолетней мерзлоты, в более частых и интенсивных экстремальных погодных явлениях. Все эти проявления изменения климатических условий оказывают существенное влияние на промышленные объекты и технологические процессы добывающей промышленности. Особенно негативное воздействие на инфраструктурные объекты оказывает деградация многолетнемерзлых пород, создавая риски для транспортной инфраструктуры, гидротехнических сооружений, включая хвостохранилища, а также функционирования шахт и карьеров.

а) б)

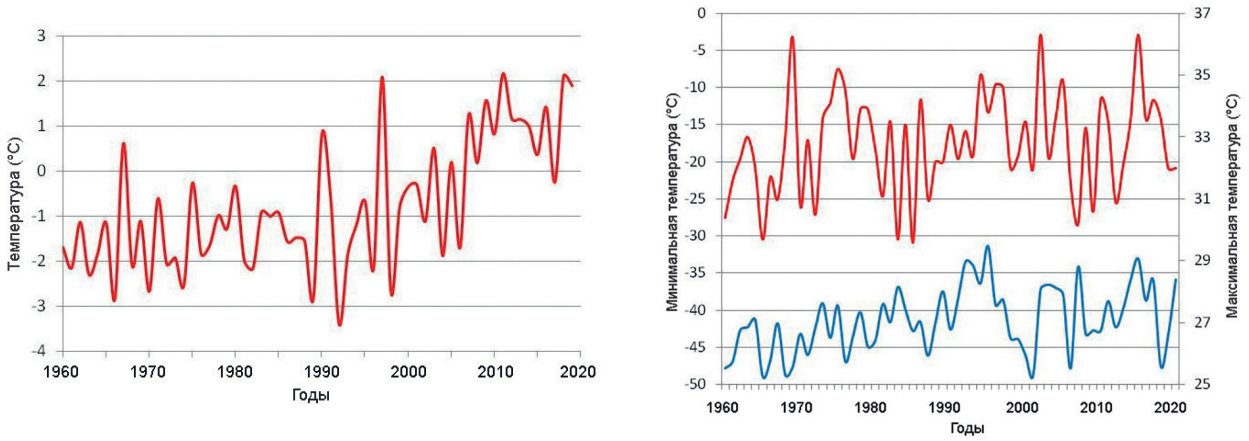



***Рис. 3.1.7.4*** *Изменение температурного режима на территории СФО: а) средняя температура воздуха в теплый период года (апрель – октябрь), Хатанга (Красноярский край); б) минимальная и максимальная температура воздуха, Тайшет (Иркутская обл.)*

Изменение режима увлажнения, в частности, наблюдаемый в отдельных районах округа рост суточного максимума осадков, создает угрозы затопления шахт и обрушения склонов карьеров. Однако с ростом температуры воздуха растет и испарение, создавая в засуш-

ливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов, что особенно характерно для Кемеровской области. К середине XXI века ожидается усиление указанных тенденций климатических изменений (Shkolnik et al., 2018; Хлебникова и др., 2019а, б; Катцов и др., 2020) (рис. 3.1.7.3б, г, 3.1.7.6б, в, г).

***Транспорт.*** Транспортный комплекс в СФО развит недостаточно. Основной вид транспорта – железнодорожный. Транссибирская магистраль – важнейшая железная дорога России – пересекает территорию Новосибирской и Кемеровской областей. Сеть автомобильных дорог в регионе развита слабо, автомобильный транспорт обслуживает только внутренние перевозки, но в настоящее время в сложных природно-климатических условиях в Томской области осуществляется строительство Северной широтной дороги (Томск – Ханты-Мансийск), призванной связать автодорогой регион с северной частью европейской зоны России. Водный транспорт представлен перевозками в основном лесных, минеральных, строительных грузов по Оби, Енисею, Ангаре, Иртышу, Лене и их притокам. Большое значение имеет Северный морской путь, который призван улучшить снабжение и вывоз продукции северных территорий. Трубопроводный транспорт представлен магистральными нефтепроводами «Нижневартовск – Анжеро-Судженск – Красноярск», «Туймазы – Омск – Новосибирск – Ангарск».

Большая часть СФО находится в зоне многолетней мерзлоты. В этих районах находится развитая система трубопроводов, подверженных воздействиям опасных геокриологических процессов. Кроме этого, в условиях прогнозируемого увеличения годового и сезонного стоков на реках Сибири и изменения их ледового режима, значительно возрастут нагрузки на подводные трубопроводы, особенно в Красноярском крае, Тюменской, Новосибирской, Омской, Томской и Иркутской областях, что вызовет рост вероятности аварийных повреждений трубопроводов (вплоть до их разрывов) с разливами нефти и выбросами газа, влекущими значительные экологические катастрофы.

Прогнозируемый рост среднегодового количества осадков преимущественно за счет их увеличения в холодный период (рис. 3.1.7.3г), вызовет повышенную опасность весенних половодий на реках водосбора Енисея.

В районах с высокими уровнями весеннего и весенне-летнего половодья на реках юга Западной Сибири в отдельные годы может сформироваться половодье, максимум которого в пять раз превышает среднемноголетний максимальный расход. Рост осадков летнего периода увеличивает риск опасных паводков. Для большинства субъектов СФО паводки имеют меньшую значимость, чем весеннее половодье. Однако в последние годы они все чаще принимают чрезвычайный характер (например, паводок в Новокузнецке в октябре 2019 года) и, возможно, в будущем на территории СФО значимость паводков будет возрастать (Игнатьева, Кнауб, 2020).

Основной проблемой для транспортной инфраструктуры рассматриваемого региона станет увеличение повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды, таких как сели (Алтайский край и республика), природные пожары как лесные (Иркутская область, Красноярский край), так и торфяные (Новосибирская, Омская и Томская области, половодья (весь юг региона), смерчи, вихри, шквалы, сильные ветры (Республика Тыва, Омская область), продолжительные и интенсивные метели (северные районы). О негативном влиянии этих явлений на работу транспорта см. главу 2.3.6.

***Производство и передача энергии.*** Основная часть электростанций СФО сосредоточена в южной части округа, прежде всего, в Кузбассе и прилегающих к нему районах. На ТЭС приходится примерно 51% в структуре мощности электростанций округа, на ГЭС – 49%. Наиболее крупными ГРЭС являются Березовская и Назаровская, расположенные на юге Красноярского края и работающие на угле Канско-Ачинского бассейна, а также Беловская ГРЭС (Кемеровская область, Кузбасс). Наблюдаемое изменение климата, одним из проявлений которого в этом районе является увеличение интенсивности, повторяемости и длительности волн тепла, может привести к снижению эффективности охлаждения энергоблоков ТЭС и уменьшению выработки электроэнергии (см. главу 2.3.5). Несмотря на снижение средних скоростей ветра, опасные явления, связанные с ветром, по-прежнему наносят наибольший ущерб на территории СФО. Высокие ветровые нагрузки могут создавать аварийные ситуации на ЛЭП и нарушать внешнее энергоснабжение электростанций. Эта проблема становится особенно актуальной в связи с большой степенью изношенности электросетей в этом регионе. По результатам климатического моделирования, к середине XXI века ожидается дальнейший рост максимальных температур воздуха (рис. 3.1.7.5е). На юге СФО вероятно увеличение максимальной длительности волн тепла на пять – шесть дней (Школьник и др., 2022); периоды с экстремально высокими температурами могут отмечаться один-два раза в год (Тюсов и др., 2017). Такое изменение температурного режима на территории округа увеличит вероятность высокой пожароопасности и смерчей, представляющих угрозу как для агрегатов электростанций, так и для ЛЭП.

Развитие возобновляемых источников энергии в СФО является одной из актуальных задач электроэнергетической отрасли в связи с острым энергетическим дефицитом во многих регионах и наличием большого числа населенных пунктов без централизованного энергоснабжения.

По данным (Минтопэнерго России, 1994), потенциал экономических ресурсов ВИЭ (в млрд кВт•ч ежегодного возобновления) оценивается следующим образом: ресурсы солнечной энергии 16,05, ветровой энергетики 10,2, гидроэнергетические ресурсы малой гидроэнергетики 79,27, ресурсы энергии биомассы 18,9, геотермальной энергии 108,0.

Самым большим солнечным потенциалом в СФО обладает Алтайский край. Продолжительность солнечного сияния в этом регионе 1935-2170 часов за год, что выше, чем на тех же широтах европейской территории России. Годовая суммарная радиация оценивается в 1330 кВт·ч/м$^2$ (Благовещенка). В летние месяцы величина суммарной радиации составляет около 65% от возможной.

В крае действует несколько солнечных электростанций. По установленной мощности СЭС среди регионов округа лидером стал Алтай (120 МВт). В 2021 году начаты строительно-монтажные работы на Нововаршавской солнечной электростанции в Омской области с установленной мощностью 30 МВт. В настоящее время СФО занимает второе место после ЮФО по объему мощностей солнечных фотоэлектрических установок, введенных в эксплуатацию бизнесом за последние шесть лет.

Удельная годовая выработка электроэнергии фотогенератором при КПД 15% в южных районах округа достигает 270-290 кВт·ч/м$^2$. На территории края могут успешно эксплуатироваться

солнечные коллекторы различных типов. В период с апреля по сентябрь удельная выработка тепловой энергии составляет 750-800 кВт·ч/м$^2$ (Росгидромет, 2014).

Согласно модельным прогнозам, ожидаемый к середине и концу XXI века рост суммарной радиации до 2-4% и температуры на 4-6 °С будет способствовать увеличению выработки тепловой энергии солнечными коллекторами. На производительность фотоэлектрических батарей изменения практически не повлияют.

Ветровая энергетика в СФО развита слабо по сравнению с солнечной, однако потенциал ветроэнергетики во многих регионах достаточен для ее развития. Согласно Генеральной схеме размещения ветроэнергетических станций Российской Федерации, юг Западной Сибири, в частности, западная часть Алтайского края, является одной из перспективных территорий (Минэнерго России, 2009). Анализ ветрового режима территории Алтайского края (Никольченко, Сухова, 2013; Котилко, Фарков, 2013) показал возможность строительства достаточно крупных ветроэнергопарков в степных районах Алтайского края.

Использование ветроэнергетических установок является важной составляющей устойчивого развития Алтайского региона. Оно позволит создать бескризисную, самодостаточную автономную энергосистему и привлечь высококвалифицированных специалистов в энергетику и промышленность края. Потребителями энергии ветра на территории края могут стать фермерские и крестьянские предприятия, сфера малого и среднего бизнеса, туристические базы, а также иные объекты рекреационной инфраструктуры.

В работе (Бастрон и др., 2015) рассмотрены возможности развития ветроэнергетики на территории муниципальных образований Красноярского края, самого большого региона СФО.

В Красноярском крае наибольшим ветровым потенциалом характеризуется его северная часть – Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, где средние годовые скорости ветра 5-7 м/с, удельная мощность ветра более 1200 Вт/м$^2$, годовая удельная потенциальная энергия ветра более 7000 кВт·ч/м$^2$. Этот огромный потенциал практически не используется, поскольку на данной территории нет крупных потребителей, способных принимать нагрузку от ВЭУ большой мощности.

На сегодняшний день рекомендуемый для большей части Красноярского края диапазон мощностей ВЭУ составляет 1-1,5 МВт. Такие ВЭУ могут покрыть нагрузку небольшого предприятия или крупного поселка с децентрализованным энергоснабжением. Использование ВЭУ очень малой мощности (5-10 кВт и менее) возможно на территории всего Красноярского края при размещении ВЭУ на возвышенностях, равнинных местах или на границе крупных водоемов (например, Красноярского водохранилища). Производительность ВЭУ малой мощности на территории центральных и южных районов будет менее эффективной, чем на территории Севера. В целом малая ветроэнергетика позволит решать точечные задачи малых частных потребителей, но не может существенно повлиять на энергетическую политику в крае.

В округе предполагается принятие комплекса мер, направленных на существенное снижение негативного влияния деятельности предприя-

тий энергетического сектора на окружающую среду, увеличение использования возобновляемых источников энергии для северных территорий, Прибайкалья и других районов децентрализованного электрообеспечения.

Объединенная энергосистема СФО состоит из восьми региональных энергетических систем, которые объединяют 10 субъектов Российской Федерации, входящих в состав округа. Электросеть ОЭС Сибири формирует линии электропередачи классом напряжения 110-1150 кВ и общей протяженностью 102614 км (по данным на 01.01.2021 г.). Гололедные нагрузки на территории всего СФО в основном незначительны (большая часть округа отнесена ко II району, согласно СП «Нагрузки и воздействия» (2016)). Это связано с тем, что значительная часть округа находится зимой под влиянием Сибирского антициклона, для которого характерны очень низкие температуры и слабые ветры. При таких погодных условиях образуется лишь кристаллическая изморозь, которая не создает больших нагрузок. Исключение составляют территории на побережье, где большая влажность и сильные ветры способствуют благоприятным условиям для образования гололедных отложений на территории Алтайского края и Республики Алтай, поскольку в горном рельефе также формируются условия для образования гололедных отложений.

Аварии на ЛЭП в СФО в основном связаны с такими явлениями, как сильные ветры, смерчи, шквалы, грозы. На территории СФО отмечается тенденция к увеличению повторяемости неблагоприятных явлений с ветром и грозами, которые наносят ущерб. Наибольший вклад в эту повторяемость вносят явления, связанные с ветром (сильный ветер, смерч, шквал).

Вместе с тем стоит отметить, что на территории СФО увеличивается интенсивность грозовой деятельности, особенно в южных районах округа. В связи с этим возрастает риск аварийных отключений на высоковольтных линиях из-за низкой грозоупорности.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Современные изменения термического режима на территории СФО оказывают значительное влияние на условия функционирования ЖКХ. На протяжении XXI века ожидается усиление наблюдаемых тенденций. Повышение средней температуры отопительного периода к середине XXI века составит около 5 °С на Таймыре и около 2 °С – в южных областях округа (рис. 3.1.7.5в). Ожидаемое относительное изменение величины градусо-суток отопительного периода увеличивается с востока на запад, составляя около 10% вблизи границы с Якутией и достигая 15-18% в западных районах Красноярского края и южных густонаселенных областях округа (рис. 3.1.7.5г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления на региональном уровне в холодный период года. В то же время в южных районах СФО в зимний сезон ожидается рост числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 3.1.7.5ж), который – в сочетании с увеличением количества зимних осадков – может привести к ускоренному старению зданий и потребовать повышения затрат на их эксплуатацию.

В летний сезон на территории Иркутской области ожидается значимое увеличение такого показателя как дефицит холода (рис. 3.1.7.5з), свидетельствующее о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. На фоне сравнительно слабого увеличения дефицита тепла ожидаются

периоды пиковой нагрузки на энергосистемы, связанные с волнами тепла (рис. 3.1.7.5е).

На всей территории СФО ожидается значительное относительное увеличение количества атмосферных осадков как в теплый, так и в холодный периоды (рис. 3.1.7.6а, б). Это изменение сопровождается изменением режима выпадения осадков, которое проявляется как в увеличении их интенсивности, так и в изменении продолжительности периодов без осадков. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.7.6в, г), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции в холодный сезон (рис. 3.1.7.6в, д), будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. В то же время увеличение продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.7.6ж, з), ожидаемое в Республиках Тыва, Алтай и Иркутской области, может привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С (рис. 3.1.7.5б) и увеличение продолжительности теплого сезона (рис. 3.1.7.5а) создадут более благоприятные условия для проведения работ и уменьшат время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 3.1.7.5д, е). Специальное внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

***Туризм.*** Территория СФО включает пять туристических районов: Путоранский (север Красноярского края), Прибайкальский (Иркутская область), Саянский (Красноярский край, Республики Тыва и Хакасия), Обско-Алтайский равнинный (юг Алтайского края, Курганская, Омская, Новосибирская и Томская области) и Обско-Алтайский горный (Кемеровская область и Республика Алтай).

Климатические условия севера Красноярского края крайне суровы. Холодный дискомфортный период (средняя продолжительность числа дней с температурой ниже –25 °С от четырех до полутора месяцев), недостаточная обеспеченность теплом летнего периода определяют здесь редкую рекреационную сеть, но три заповедника (Большой Арктический, Таймырский и, в первую очередь, Путоранский) привлекают сюда любителей экстремального туризма.

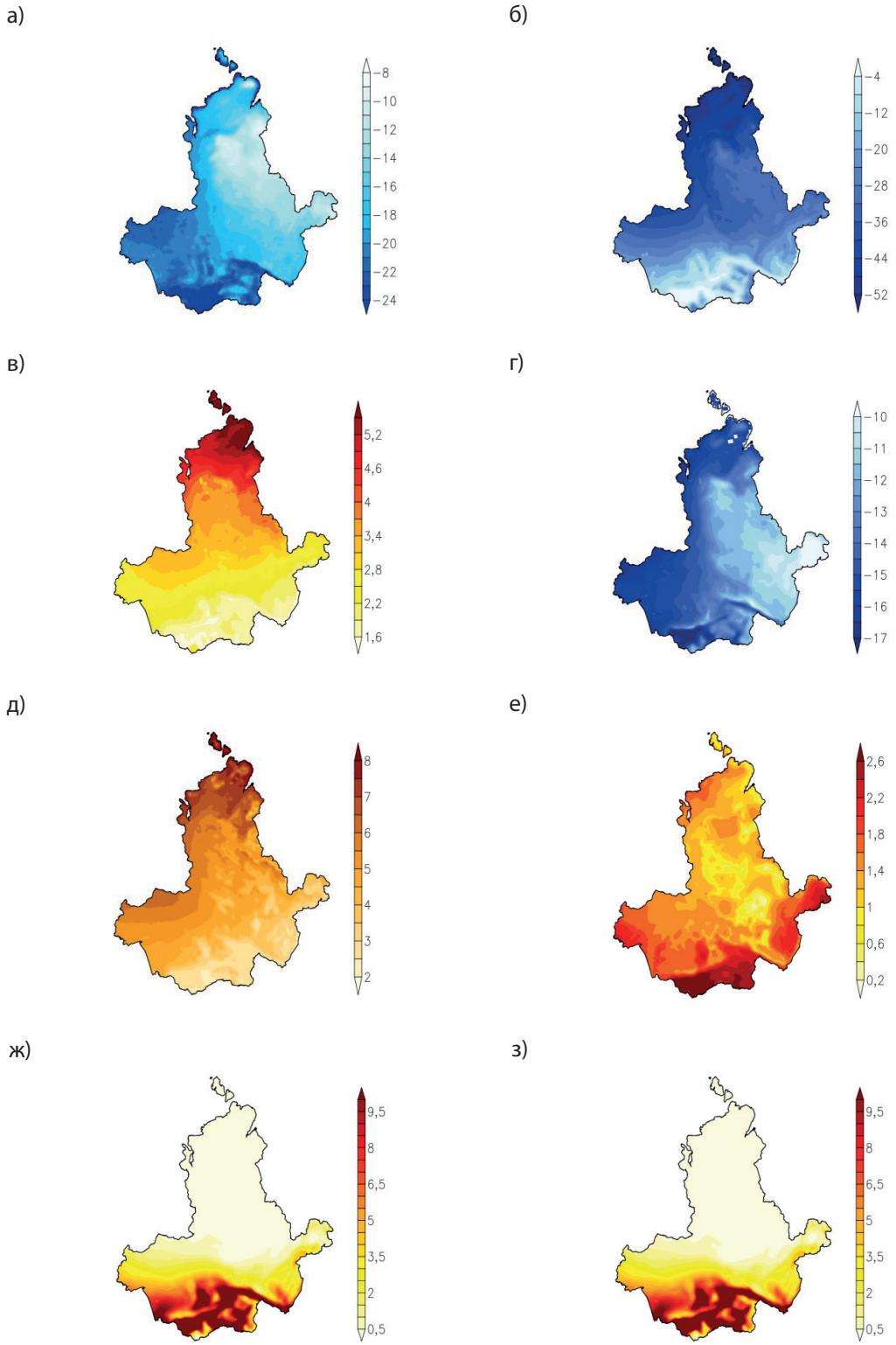



***Рис. 3.1.7.5*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории СФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха (дни); б) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (дни); в) средняя температура отопительного периода (°С); г) градусо-сутки отопительного периода (%); д) температура наиболее холодной пятидневки (°С); е) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); ж) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни), з) дефицит холода (°С•сут.). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

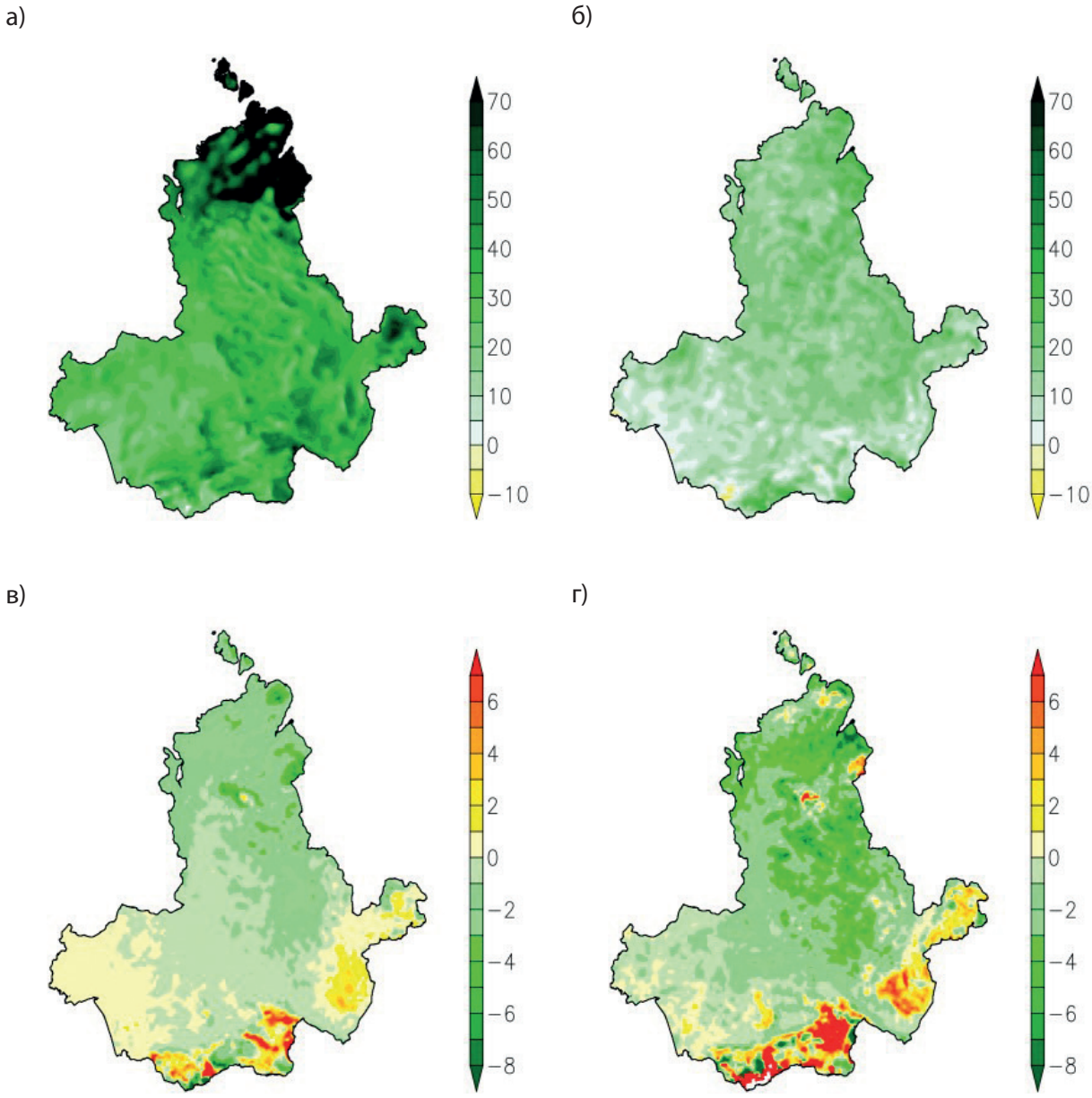



***Рис. 3.1.7.6*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории СФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сутки для теплого сезона (дни); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сутки для теплого сезона (дни). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

Биоклимат южных районов СФО более мягкий. Самый комфортный для рекреации – Обско-Алтайский регион, особенно в среднегорье. Большая продолжительность солнечного сияния, умеренно теплое, не душное лето, с продолжительным залеганием снежного покрова в зимний период (четыре-шесть месяцев), что способствует лыжным видам спорта, – все это создает благоприятные условия для развития лечебно-оздоровительного и спортивного туризма. Летняя рекреация широко представлена водными видами: байдарочными походами по горным рекам, парусными – на озерах и водохранилищах, круизными по Енисею, Оби,

Иртышу, Байкалу. Высокогорья СФО благоприятны для альпинизма, скалолазания, спелеотуризма.

В южных регионах СФО следует сделать акцент на развитии зимнего спортивного туризма (горнолыжного), особенно в западной части Об-Алтайского и Иркутском подрайонах. В настоящее время здесь отмечается увеличение повторяемости числа дней, комфортных для этого вида рекреации (температура воздуха в дневные часы от -15 °С до -5 °С, высота снежного покрова более 20 см), а к середине столетия, на фоне прогнозируемого здесь роста температур и количества осадков в зимний период, можно ожидать увеличение числа таких дней.

К угрозам, сопровождающим изменения климата в регионе, следует отнести рост температуры воздуха и уменьшение количества осадков (рис. 3.1.7.3б, 3.1.7.6в). Например, в Республике Тыва, где и сейчас средние многолетние значения средней площади одного очага лесного пожара превышены по сравнению со средними значениями по округу, а регион ориентирован на развитие массового спортивно-охотничьего туризма, это может нанести серьезный ущерб.

***Направления адаптации.*** Возможные направления адаптации видов и экосистем в СФО аналогичны рекомендованным для ЦФО и СЗФО, с особым вниманием мерам по предотвращению нарушения целостности растительного покрова в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Целесообразно использование экосистемных услуг лесов для снижения риска и последствий наводнений. В степной и лесостепной зонах приоритетным является применение защитных лесных полос.

Для горной и предгорной частей СФО, где ожидается повышение рисков опасных дождевых паводков, приоритетом являются мероприятия по развитию гидрометеорологического мониторинга в целях увеличения заблаговременности и точности прогнозов наводнений и по снижению их негативных последствий. Происходящие и ожидаемые изменения в водном режиме рек Енисей и Ангара требуют регулярной актуализации правил использования водными ресурсами Ангаро-Енисейского каскада водохранилищ.

Потепление климата создает благоприятные условия для развития сельского хозяйства и ведет к повышению его продуктивности за счет более широкого внедрения позднеспелых культур, сортов и гибридов. Как меру адаптации к изменениям климата следует рассматривать расширение посевов озимых культур в степных районах Сибири.

Для обеспечения эффективной работы объектов горнодобывающей промышленности должен быть также разработан системный подход к управлению безопасностью объектов в течение всего их жизненного цикла «планирование – строительство – эксплуатация – закрытие – рекультивация» с учетом изменения климата.

Для транспортной системы региона необходимо построение системы мониторинга состояния автомобильных дорог общего пользования, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны. Кроме того, необходима организация эффективной системы мониторинга состояния трубопроводов во избежание наступления на них аварийных ситуаций; при прокладке новых трубопроводов через реки использовать современ-

ные технологии (например, метод наклонно-направленного бурения).

При проектировании и эксплуатации ТЭС и ЛЭП необходимо принимать во внимание наблюдаемое и ожидаемое изменение значений специализированных климатических параметров. Целесообразно принятие комплекса мер, направленных на существенное снижение негативного влияния деятельности предприятий энергетического сектора на окружающую среду. Актуальной задачей является развитие ВИЭ в связи с острым энергетическим дефицитом во многих регионах и наличием большого числа населенных пунктов без централизованного энергоснабжения.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства особое внимание должно быть уделено мониторингу эволюции многолетнемерзлых грунтов в регионе. Для уменьшения ущерба, связанного с геокриологическими рисками, необходимо изменение норм строительного проектирования с учетом ослабления несущей способности многолетнемерзлых грунтов, а также применение инженерных мер адаптации существующей инфраструктуры. Рост суточных экстремумов осадков на всей территории СФО может привести к необходимости модернизации систем водоотведения на основе обновленных нормативных параметров интенсивности осадков. В южных районах СФО – в республиках Тыва, Алтай и Иркутской области – в связи с увеличением продолжительности периодов с дефицитом осадков при высоких летних температурах – желательно принятие превентивных мер, направленных на повышение эффективности водопотребления. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

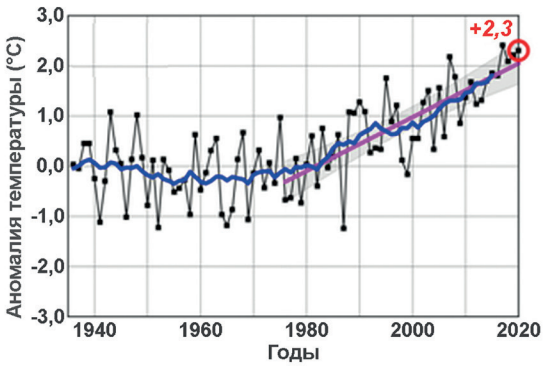
Для туристской отрасли целесообразно развитие зимних видов рекреации в южных областях региона. Необходима разработка программы научных мониторинговых обследований туристских дестинаций для оценки изменений в экосистемах и принятия необходимых мер по защите наиболее уязвимых к последствиям изменения климата видов флоры и фауны, а также важных для туристской деятельности ландшафтов.

## 3.1.8 Дальневосточный федеральный округ (ДФО)

### 3.1.8.1 Изменения климата на территории ДФО

***Наблюдаемые изменения климата.*** Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории ДФО (рис. 3.1.8.1а). В период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха во Владивостоке возросла примерно на 2 °С, в Анадыре на 3 °С, а в Якутске – на 4 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Увеличение годовых сумм осадков в южной и восточной частях ДФО (рис. 3.1.8.1б) обусловлено возрастанием количества осадков и в холодный, и в теплый периоды года. На севере округа количество осадков возрастало в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества это не отразилось на изменении годовых сумм.

а)




б)

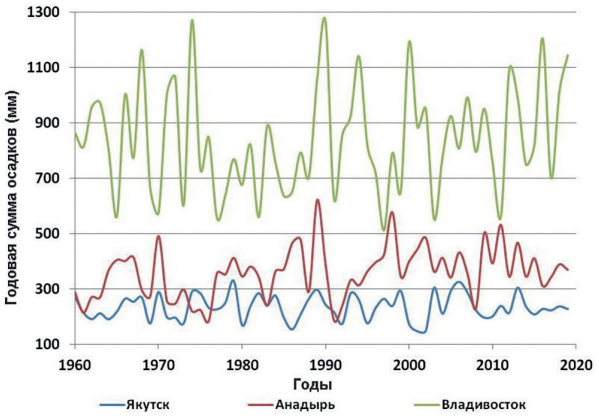
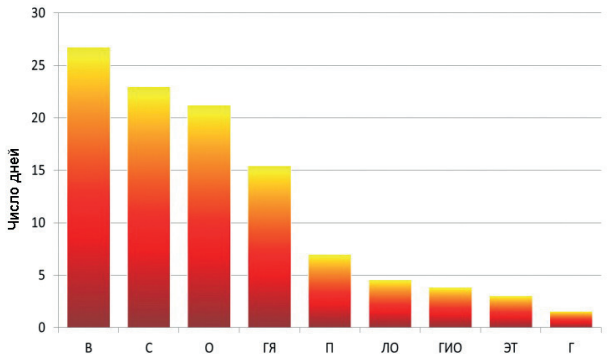



***Рис. 3.1.8.1*** *а) Временные ряды среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха (°С), осредненных по территории ДФО, 1936-2020 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная синяя кривая показывает ход 11-летних скользящих средних, а отрезок прямой сиреневого цвета – линейный тренд за 1976-2020 гг. (с 95%-м доверительным интервалом), б) Годовые суммы осадков, мм, Якутск, Анадырь, Владивосток, 1960-2020 гг.*

В последние десятилетия в ДФО увеличилась повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, связанных чаще всего с экстремальными скоростями ветра и количеством осадков, а также высокой степенью пожароопасности (рис. 3.1.8.2).

а)




б)

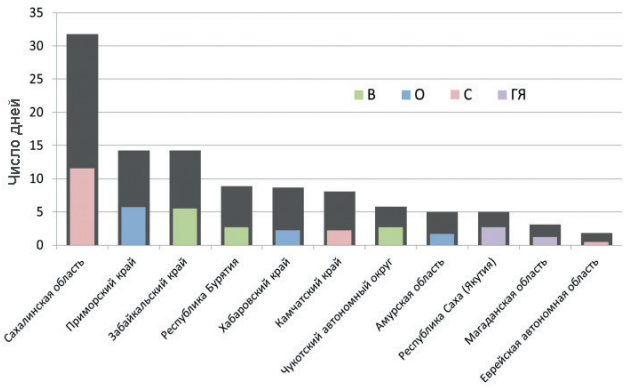



***Рис. 3.1.8.2*** *а) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории ДФО в 1991-2020 гг.; б) Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб на территории отдельных субъектов ДФО в 1991-2020 гг. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» http://meteo.ru/data); В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

***Ожидаемые изменения климата.*** К середине XXI века по отношению к концу XX века (рис. 3.1.8.3) возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на севере

и северо-западе округа на 1-1,5 °С, а на юге и юго-востоке – на 2-3 °С (Школьник и др., 2022). Суммы осадков летом могут возрасти на 10-20%, прежде всего, на территории Республики Саха и Чукотского автономного округа. Зимой в северной части ДФО возможен рост температуры воздуха на 5-7 °С, в южной части – на 3-5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20-40%, а на побережье Северного Ледовитого океана – 50-70%.

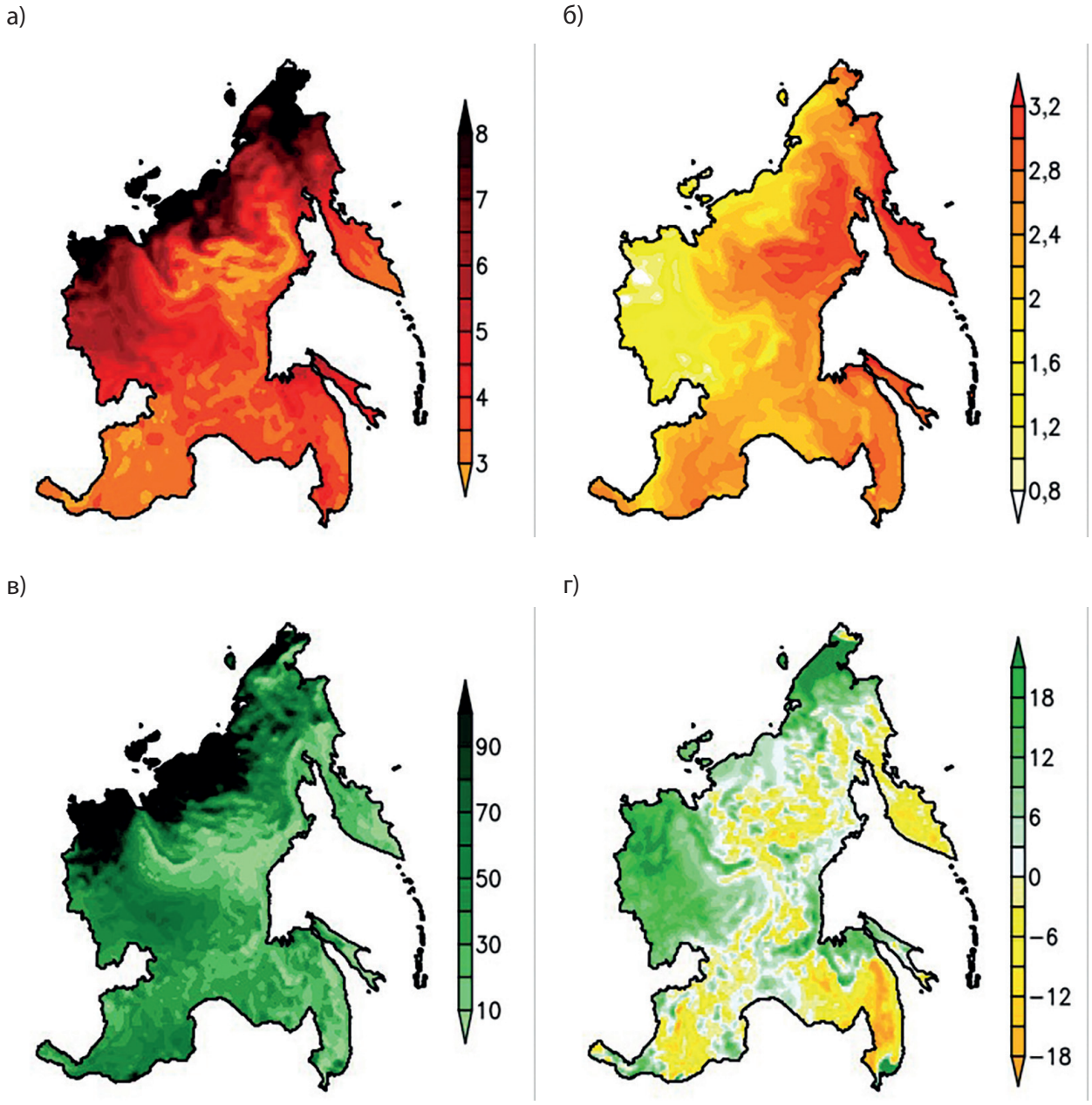



***Рис. 3.1.8.3*** *Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов на территории ДФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

### 3.1.8.2 Природные системы и экономика ДФО в меняющемся климате

***Природные системы.*** ДФО – один из самых больших и сложных в природном отношении округов. Здесь представлен широкий ряд зональных биомов: тундровые, гипоарктические (редколеснотаежные Северо-Востока Сибири с особой формацией лиственничных лесов из лиственницы Каяндера), средне- и южнотаежные биомы сибирской тайги и дубовой лесостепи. Для значительной части территории характерен горный рельеф. Здесь представлены высотно-поясные спектры Берингийского, Южносибирского, Восточносибирского, Охотского и Маньчжурского комплекса формаций.

Сопоставлением данных дистанционного зондирования 2000 и 2014 гг. выявлено продвижение на север древесно-кустарниковой растительности в низовьях Анабара, Оленека, Лены, Яны и Индигирки (Белоновская и др., 2016). Одновременно кумулятивное воздействие изменения температуры, влажности и лесных пожаров способствует отступлению южной границы леса (Barrett et al., 2020).

Отступление ледников отмечается для всех горных систем ДФО. Нивально-гляциальная зона смещается, в среднем, на 250-400 м вверх (Ananicheva, Karpachevsky, 2015; Ananicheva et al., 2020). Сокращение объема ледников Катунского хребта, а также Северо- и Южно-Чуйского с 1950-х годов оценивается в 26-28%. Для хребта Сунтар-Хаята зафиксировано также увеличение скорости отступания ледников более чем в 1,5 раза по сравнению с периодом 1968-2008 гг. (Котляков и др., 2015). Сокращение площадей небольших ледников Чукотки и Колымского нагорья за короткий период 2005-2017 гг. составляет 12-30% и 20-24%, соответственно (Ananicheva et al., 2020).

Прогнозируются распространение тайги на северных пределах и в горах, где она будет активно наступать на альпийский пояс, а также перестройка ландшафтов, связанная с деградацией мерзлоты, и расширение степных биомов (Жильцова. Анисимов, 2015). Сложный рельеф обусловливает очень пеструю картину изменений.

Опубликованы многочисленные подтверждения изменения видового разнообразия и ареалов растений и животных. За последние 30-40 лет в районе Тикси выявлено исчезновение нескольких видов растений, что может быть связано с более быстрым сходом снега и «усилением присутствия» видов многолетних трав и кустарничков (Тишков и др., 2020). На территории Якутии зафиксировано резкое увеличение числа видов растений, которое не может быть объяснено только повышением степени изученности территории. Достоверно установлено смещение северной границы распространения благородного оленя и косули, которые теперь встречаются вплоть до полярного круга (Десяткин, 2018). Увеличение количества зимних осадков и высоты снежного покрова в последние годы вызвали вспышки миграционной активности косули, при этом протяженность переходов достигала 50-200 км, впервые за более чем 50 лет существования вида в регионе (Пчелкин, 2020). На Чукотке за последние 20 лет отмечено 56 новых видов птиц (Тишков и др., 2020), орнитофауна Якутии за полвека увеличилась на 48 видов (Десяткин, 2018). Для котловины озера Байкал отмечается увеличение числа видов птиц с 321 до 405, главным образом за счет залетных. Ареал некоторых видов, занимающих водно-болотные угодья, расширил-

ся на 700 км к северу, тогда как в горных экосистемах изменения ареалов птиц минимальны (Мельников, 2018). В бассейне Зеи за последние 30 лет наблюдается тенденция расширения ареала к северу у большого баклана, мандаринки, малого перепелятника, ширококрылой кукушки, восточной совки, иглоногой совы, обыкновенной сороки и др. (Яковлев, 2017; Антонов и др., 2016). Ареал восковой пчелы расширился на 100 км на северо-восток за 10 лет (Прощалыкин, Сергеев, 2020). На 400-500 км расширился ареал иксодовых клещей. С конца 1990-х – начала 2000-х годов отмечается появление новых видов насекомых-вредителей: капустной белянки, капустной тли, большой злаковой тли, голых полевых слизней (Десяткин, 2018).

Как и в других регионах, во всех биомах от Якутии до Командорских и Курильских островов у многих видов растений отмечается сдвиг весенне-летних фенологических дат на более ранние сроки, а осенних – на более поздние. В то же время упоминаются виды, для которых изменения не проявляются, и у отдельных видов происходит смещение на более поздние сроки (Рожкова, 2018; Бисикалова, 2018; Иванов, Моисеев, 2020; Санданов, 2020; Сырица, 2020). Сдвигаются не только сроки прилета птиц, но и кукования кукушки, «блеяния» бекаса, выхода щенков песцов из нор, хода кижуча, появления первых крупных комаров и шмелей и др. Также некоторые события не имеют четкого тренда или происходят позже, например, ход нерки (Рожкова, 2018; Иванов, Моисеев, 2020; Ананин, 2019).

Продвижение лесных экосистем на север, а также увеличение глубины протаивания способствуют существенному повышению продуктивности таежных и тундровых биомов на равнине и в горах. Аридизация степных биомов, напротив, способствует сокращению продуктивности, хотя опустынивание не прогнозируется.

Уязвимость экосистем к изменению климата связана главным образом с лесными пожарами и биогенными факторами. Немаловажную роль играют также экстремальные осадки и наводнения (катастрофическое наводнение на Амуре и его притоках в 2013 г., паводки в Якутии), деградация мерзлоты, ветры со скоростью более 40 м/с, сели и оползни, разрушение берегов штормовыми волнами. Ожидается дальнейший рост перечисленных воздействий (см. главу 2.1.1).

В Центральной Якутии глубина сезонного протаивания под лесами увеличилась на 30-40 см по сравнению с 1960-1970 гг., в тундре – до 1 м и более. Дополнительное поступление влаги из тающих верхних слоев мерзлых пород привело в последние 10 лет к повсеместному расширению озер аласных котловин, водохранилищ и повышению стока малых рек региона. В результате происходит затопление обширных территорий (Десяткин, 2018).

Согласно (Magritsky et al., 2017), характерны усиление гумидизации и увеличение речного стока для биомов Котуйско-Ленских лесотундрово-северотаежных, бореальных Северо-восточно-Забайкальских, Верхояно-Колымских, Алдано-Майских, Северо-восточно-Забайкальских. Озера Зун-Торей и Барун-Торей, расположенные в Даурских степных биомах, под влиянием стабильного снижения увлажнения территории за период с 2008 по 2017 гг. периодически пересыхали (Баженов, 2019).

***Баланс почвенного углерода.*** По данным Национального атласа Арктики (2017), в арктической зоне ДФО с преобладанием тундровых и сопутствующих им почв запасы орга-

нического углерода в слое 0,0-1,0 м изменяются от очень низких (менее 40 т/га) до сверхвысоких (400-800 т/га). В наиболее характерных для округа лесных биомах при минимальной для лесов России доле запасов углерода в фитомассе отмечается сравнительно высокий уровень именно почвенного пула углерода: суммарно для всех лесопокрытых участков, за исключением Бурятии и Забайкальского края, он приближенно составляет190 т/га в слое 0-50 см, и в среднем 160 т/га в слое 0-1 м (Уткин и др., 2006; Честных и др., 2020).

Для целей количественного определения объемов поглощения парниковых газов при нарушении и восстановлении лесных и кустарниковых фитоценозов округа в качестве референтных приняты почвенные запасы углерода в 73-121 т/га для лесопокрытых участков различных субъектов Российской Федерации, входящих в ДФО, и 136-155 т/га – для участков, покрытых кустарниковой растительностью (Методические указания, 2017).

Информация о дыхании почв округа как основной расходной составляющей их углеродного бюджета носит разобщенный характер. Значительная часть локальных исследований касается почв лесных экосистем и агроценозов Приморского края. В частности, на примере лесов Сихотэ-Алиня показано, что разложение лесной подстилки формирует до 16% всей почвенной эмиссии $CO_2$ (Иванов и др., 2018); кроме того, для освоенных почв Южного Приморья отмечено снижение интенсивности дыхания по сравнению с естественными аналогами (Пуртова и др., 2013). В целом для почв ДФО годовая эмиссия углерода оценивается в широком диапазоне – от 0-0,5 т/га для Чукотки, Магаданской области и Севера Якутии до 4-6 и более т/га для Приамурья (Национальный атлас почв, 2011; Национальный атлас Арктики, 2017).

С точки зрения углеродного баланса почв ДФО в целом является «плюсовым» и занимает по данному показателю второе место после СФО. Это достигается в первую очередь благодаря накоплению углерода в почвенном звене лесных экосистем, ежегодно секвестирующих в верхних 30 см профиля почв от шести до семи млн т углерода (Замолодчиков и др., 2018).

Принадлежность основной части территории округа к криолитозоне определяет высокую чувствительность почвенного покрова к климатическим изменениям. Деградация многолетнемерзлых пород усиливает дыхание почв (Шепелев и др., 2016), а вдоль морских побережий и в речных долинах сопровождается выносом больших объемов растворенного и взвешенного органического вещества поверхностным стоком в океан с последующим частичным секвестированием углерода донными отложениями (Холодов и др., 2003). На уровне отдельных почв показано, что активизация криогенных процессов, сопутствующая таянию мерзлоты, мобилизует углерод не только органических соединений, но также карбонатов (Чимиторджиева и др., 2019).

Наряду с деградацией многолетней мерзлоты наиболее очевидным следствием глобальных климатических изменений, влияющим на углеродный баланс почв в масштабах округа, является увеличение повторяемости лесных и степных пожаров. В связи с этим адаптационные мероприятия, обсуждаемые применительно к ДФО, в основном касаются противодействия именно этим двум негативным процессам. Наибольшая эффективность ожидается от лесоохранных и лесовосстановительных ме-

роприятий, способствующих закреплению углерода в биомассе и в почвенном детрите и гумусе в дальнейшем.

***Водные ресурсы.*** ДФО обладает наиболее значительными водными ресурсами, составляющими 2001 км$^3$ в год. В пределах территории округа расположена большая часть бассейна реки Лена, бассейны рек Колыма, Индигирка, Яна, Оленек, российская часть бассейна Амура.

В многолетних колебаниях водных ресурсов, из которых 80% формируются на территории округа, присутствует статистически значимый положительный тренд. В 1978-2020 гг. по сравнению с предшествующим периодом (1936-1977 гг.) водные ресурсы ДФО, водообеспеченность территории увеличились на 4%. Основной вклад (7-11%) в современное увеличение водных ресурсов вносят реки, относящиеся к бассейну Северного Ледовитого океана. При повышенной водности существенно увеличилась вариация колебаний годового стока этих рек. В отличие от северных рек, годовой сток реки Амур в последние десятилетия снизился на 8%. Снижение годового стока отмечается также на реках Забайкалья и крайнего северо-востока ДФО.

***Сельское хозяйство.*** Последствия изменения климата в регионе, как и в СФО, связаны с ростом термических ресурсов. Ожидается потепление во все сезоны года – оценки тенденций повышения температуры воздуха составляют от 0,3 до 0,5 °С за 10 лет, а также увеличение среднего количества осадков зимой и весной. Количество летних осадков за последнее десятилетие понизилось только в Республике Бурятия и Забайкальском крае – от 15 до 20% относительно 1961-1990 гг. Наблюдаемый повсеместно рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, а также увеличение продолжительности вегетационного периода являются положительными факторами развития сельского хозяйства региона. Увеличение повторяемости засушливых явлений в ряде районов не ведет к снижению продуктивности аграрного производства, благодаря высокой исходной увлажненности территории. Наблюдаемые изменения агрометеорологических условий территории региона в целом способствуют росту урожайности сельскохозяйственных культур. Возможны увеличение площадей озимых культур, благодаря улучшению условий перезимовки, а также расширение посевов риса и сои в связи с ростом тепловых ресурсов. Так же, как и в СФО, в последние годы на Дальнем Востоке наблюдается увеличение ущерба сельскохозяйственным растениям от возрастания роли нестадных саранчовых вредителей. Особенно уязвимы Республики Бурятия и Саха-Якутия, Забайкальский край, Амурская область. При дальнейшем увеличении теплообеспеченности и засушливости региона роль нестадных саранчовых вредителей может возрасти в еще большей степени, что необходимо учитывать при планировании агротехнических и мониторинговых мероприятий. В Приморском крае и Амурской области может усилить влияние ущерб от колорадского жука за счет увеличения числа его генераций и проникновения этого вредителя в более северные районы острова Сахалин и Хабаровского края. В последние годы наблюдается усиление опасного дальневосточного вредителя картофеля и других овощных культур – картофельной коровки или эпиляхны *(Epilachna vigintioctomaculata*), которая наносит существенный вред картофелеводству Приморского края, южных частей Хабаровского края, Амурской области и острова Сахалин. Отмечается тенденция расширения ареала в более северные регионы. Требуются

своевременные обработки инсектицидами, использование устойчивых сортов и соблюдение севооборотов.

***Добывающая промышленность.*** Влияние климатических изменений на объекты и процессы добывающей промышленности ДФО очень неоднородно на фоне разнообразия геологических, физико-географических и климатических условий региона. Одним из определяющих факторов является увеличение средней годовой температуры воздуха практически на всей территории округа за счет роста температуры как в холодный, так и в теплый периоды года. Этот процесс имеет как отрицательные, так и положительные последствия для добычи полезных ископаемых. Повышение температуры воздуха, наблюдаемое на территории ДФО, способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако в районах распространения многолетнемерзлых пород потепление климата приводит к уменьшению несущей способности мерзлого грунта. В области наибольшего геокриологического риска находятся Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии (Анисимов, Стрелецкий, 2015; Калабина, Зворыкина, 2019). В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме до Певека на побережье Восточносибирского моря, снабжающие электроэнергией многие горнодобывающие предприятия.

Негативным фактором, связанным с изменением климата, является и рост повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений, в частности, усиление пожароопасности на фоне длительных волн тепла и засушливых периодов. Это явление особенно ярко проявилось летом 2021 г. в Республике Саха и Иркутской области, что привело к огромным материальным потерям. Пожароопасные ситуации создают значительные риски для объектов добывающей промышленности, прежде всего, добычи нефти, газа, бурого и каменного угля.

В то же время в последние десятилетия на территории многих субъектов ДФО (Республики Саха, Амурской области и др.) отмечаются экстремальные суточные суммы осадков в отдельные годы (см. главу 2.3.1). Следствием более интенсивных осадков может стать усиление оползней и обвалов в карьерах и шахтах, их затопление из-за сбоев в работе систем водоотведения, нарушение гидрологического режима хвостохранилищ.

Согласно прогнозным оценкам, указанные тенденции изменения температурно-влажностного режима к середине XXI века на территории ДФО сохранятся (Школьник и др., 2022) (рис. 3.1.8.4б, г, 3.1.8.6б, в, г). Увеличение суточных максимумов осадков в Республике Саха, Иркутской и Амурской областях могут составить 20-50% по отношению к периоду 1990-1999 гг. При этом возрастут риски и экстремально высоких температур воздуха (Хлебникова и др., 2019а, б) (рис. 3.1.8.5д).

***Транспорт.*** По сравнению с другими территориями России, транспортная инфраструктура ДФО развита слабо: плотность железных дорог в 3,6 раза, а автомобильных дорог с твердым покрытием в 5,6 раза ниже, чем в среднем по России. Около 1400 населенных пунктов не имеют круглогодичной связи с опорной сетью автодорог. Нормативное транспортно-эксплуатационное состояние не обеспечивается почти на половине протяженности федеральных и региональных трасс, с чем связана

высокая аварийность движения в округе. В значительной степени такое положение обусловлено природно-климатическими условиями в регионе, которые на большей части территории Дальнего Востока характеризуются как весьма суровые и даже экстремальные.

Влияние прогнозируемых климатических изменений в значительной степени усугубит ряд проблем, связанных с эксплуатацией и строительством новых объектов транспортной инфраструктуры. Рост температуры воздуха, с одной стороны, может принести определенную выгоду: улучшение ледовой обстановки на севере округа позволит увеличить грузооборот в арктических морях по Северному морскому пути, увеличится и период навигации внутреннего водного транспорта, играющего значительную роль в регионе со слабой транспортной структурой (при недостаточно развитой авто- и железнодорожной инфраструктуре обеспеченность Дальнего Востока судоходными речными путями в три раза выше среднероссийского уровня).

В то же время подъем температуры провоцирует таяние вечномерзлых грунтов, вызывая негативные воздействия на транспортную инфраструктуру, включая аэродромы, автомобильные дороги. Увеличение мощности сезонного протаивания и деградации многолетней мерзлоты уже сейчас приводит к росту числа случаев деформации и разрушения трубопроводов, а такие опасные процессы как оползни на оттаивающих склонах и медленное течение талого грунта (солифлюкация) будут только усиливаться. В ДФО деструктивные геокриологические процессы и явления распространяются почти на всей территории Якутии и Чукотки.
К другим негативным последствиям подъема температуры относятся:

- интенсивное таяние ледников, что спровоцирует рост числа селевых потоков, формирующихся в основном на северо-западе округа, в Амурской области, на Сахалине и Камчатке;
- увеличение числа дней с температурой выше 30 °С в южной части ДФО (в Амурской области, Еврейской автономной области и Хабаровском крае) и в центральной части Республики Саха. Такие температуры, помимо технологических проблем (удлинения рельсов, распада органических изоляционных материалов, деформации автодорожного полотна и др.), могут вызывать и ухудшение физического состояния водителя, провоцируя рост дорожно-транспортных происшествий;
- сокращение эксплуатационных сроков и пропускной способности зимних (ледовых) дорог.

Значительное негативное влияние окажет и прогнозируемое (Хлебникова и др., 2019б) к середине столетия увеличение максимальной интенсивности и суточного максимума осадков во влажные периоды как теплого, так и холодного периодов года. Наибольшая повторяемость сильных дождей отмечается в Приморском и Хабаровском краях, на Сахалине и Камчатке (рис. 3.1.8.6а, б).

Сильные дожди сопровождаются дождевыми наводнениями и паводками, которые наносят значительный ущерб транспортным коммуникациям. На территории ДФО наводнения являются одним из наиболее часто повторяющихся и опасных по масштабам наносимого ущерба стихийных бедствий. Особенно значительными по масштабу и ущербу являются вызванные тайфунами ливневые наводнения в Приморском крае и Амурской области.

В холодный период года возрастет повторяемость сильных снегопадов, которые оказывают парализующее действие на автомобильное и железнодорожное движение. Территория ДФО характеризуется высокой частотой и интенсивностью снегопадов на Сахалине, Курилах и Камчатке (максимальный суточный прирост снежного покрова в этих районах до 70-80 см).

Сильный ветер, характерный для прибрежных регионов округа, и обильные снегопады станут причиной увеличения повторяемости и интенсивности снежных заносов, при которых не работают аэропорты, прекращается автомобильное и железнодорожное сообщение. В округе максимальные объемы снегозаносов характерны для арктических районов Якутии, прибрежных районов Чукотки, Камчатки и Магаданской области, где объем снегоотложений может достигать 1000 м$^3$ на погонный метр.

***Производство и передача энергии.*** Основные энергетические мощности Дальнего Востока сосредоточены в южной части региона, где они соединены в общую энергосистему. Энергосистемы северных территорий работают изолированно, обеспечивая локальных потребителей. Наиболее крупной ГРЭС является работающая на местном угле Приморская ГРЭС. Многочисленные ТЭЦ и дизельные станции расположены в северной части округа. В Чукотском автономном округе действует небольшая Билибинская АЭС. Это единственная атомная электростанция, построенная в зоне многолетней мерзлоты. Последствия таяния многолетней мерзлоты в районе расположения Билибинской АЭС носят комплексный характер и обусловливают риски как для целостности самих агрегатов электростанции, так и для транспортной инфраструктуры, что может нарушить нормальное снабжение АЭС.

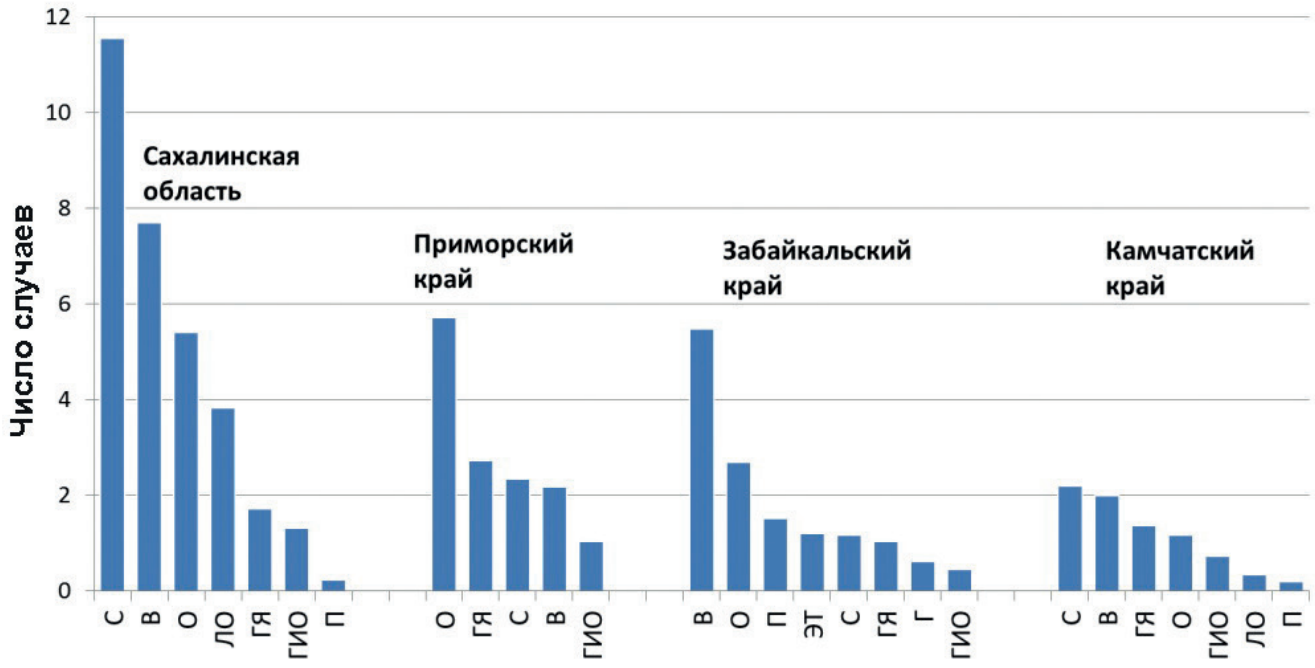



***Рис. 3.1.8.4*** *Повторяемость различных видов опасных явлений, нанесших экономические ущербы в отдельных субъектах ДФО в 1991-2019 гг., число случаев в год. В – ветер, Г – град, ГИО – гололедно-изморозевые отложения, ГЯ – гидрологические явления, ЛО – лавины, оползни, О – осадки, П – чрезвычайная пожароопасность, С – снег, ЭТ – экстремальные температуры*

Изменения климата на территории округа выражаются в увеличении повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений: экстремальных осадков, приводящих к наводнениям (в Амурской области, Приморском, Хабаровском краях), сверхнормативных снеговых (в Сахалинской области, Камчатском крае) и ветровых (в Забайкальском крае, Республике Бурятия) нагрузок, а также высокой степени пожароопасности (в Амурской области, Забайкальском крае, Чукотском автономном округе) (рис. 3.1.8.2).

В последние годы наблюдается рост числа природных пожаров и в арктической зоне округа. Так, в 2020 году впервые зафиксирован лесной пожар в Якутии на территории, расположенной за Северным полярным кругом. Все виды опасных явлений представляют значительную угрозу для нормального функционирования энергетических объектов, включая ЛЭП, обеспечивающих внешнее энергоснабжение электростанций.

По результатам сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима, к середине XXI века на территории Дальневосточного федерального округа ожидается рост температуры наиболее жаркого месяца, который составит около 3 °С по сравнению с 1990-1999 гг. (Хлебникова и др., 2019а), что может провоцировать дальнейшее усиление пожароопасности, несущей угрозу функционированию АЭС и ТЭС (рис. 3.1.8.5д). Кроме того, к середине века на большей части округа следует ожидать увеличения максимальной суточной интенсивности осадков на 10-20% (Хлебникова и др., 2019б) (рис. 3.1.8.6б).

Приведенные данные говорят о необходимости детального учета наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических, гидрологических, геокриологических параметров при строительстве новых мощностей и модернизации оборудования уже действующих электростанций и ЛЭП для адаптации энергетического комплекса ДФО к наблюдаемым и ожидаемым в будущем климатическим изменениям. Кроме того, целесообразно дальнейшее совершенствование систем мониторинга и оповещения об опасных гидрометеорологических ситуациях, а также улучшение планирования противопожарных мероприятий (прежде всего, меры по профилактике лесных пожаров и восстановлению лесов).

Главная особенность дальневосточной энергетики – изолированность территорий. Альтернативные источники энергии (ветер, солнце, биомасса и местные виды топлива) позволяют решать проблему зон децентрализованного электроснабжения, которые составляют более 75% территории Дальнего Востока.

Солнце – ключевой возобновляемый ресурс региона, валовый потенциал которого составляет 813 200 млнт.у.т./год, технический – 3224,4 млнт.у.т./год, экономический 0,132 млнт.у.т. (Арутюнов, 2010). Однако не во всех регионах округа этот потенциал активно реализуется.

Согласно районированию территории России по природному потенциалу гелиоэнергетических ресурсов, южные районы ДФО – Приморский край, юг Хабаровского края, Амурская область, юго-восток Забайкалья относятся к первому – самому приоритетному району (Климатические факторы, 2010). В западных районах Приморского края годовое количество поступающей на земную поверхность суммарной радиации составляет 1450 кВт·ч/м$^2$, что является мак-

симальным для территории России и составляет 70-75% от возможной радиации. Продолжительность солнечного сияния – до 2150 часов за год. Количество энергии, которое может вырабатывать фотоэлектрическая батарея при КПД фотогенератора 15%, составляет 250-290 кВт•ч/м$^2$, при использовании систем слежения за Солнцем удельная выработка электроэнергии возрастает до 350-380 кВт·ч/м$^2$.

Несмотря на такой огромный потенциал рынок солнечной энергии в южных районах округа практически не развит. В настоящее время в Забайкалье функционирует единственная солнечная электростанция мощностью 150 кВт. Солнечные батареи в Забайкальском крае используют в качестве источника энергии для бытовых нужд, для обеспечения электроэнергией фермерских хозяйств, а в комплексе с ветрогенераторами – для освещения дорог. Более интенсивное развитие гелиоэнергетики происходит в Бурятии, где введена в эксплуатацию Торейская солнечная электростанция мощностью 45 МВт, которая стала крупнейшим объектом солнечной генерации в регионе. В южных районах Хабаровского края гелиоэнергетические установки используют для подогрева воды, технологических нужд, получения электрической энергии для индивидуальных потребителей в домах коттеджной застройки. Всего в крае смонтированы гелиоэнергетические установки общей мощностью более 100 кВт (Панкратьева, 2019).

Лидером по использованию солнечной энергии на Дальнем Востоке является Якутия, где в весенне-летний период, особенно в апреле и мае, месячные суммы суммарной радиации даже в ее северных районах так же высоки, как на северном Кавказе и в Астраханской области – более 165 кВт•ч/м$^2$. В Якутии солнечных станций, больше, чем где бы то ни было в ДФО. Здесь в отдаленных населенных пунктах построено 13 солнечных станций, работающих в связке с дизельными электростанциями. В 2015 году в поселке Батагай Верхоянского улуса введена в эксплуатацию солнечная электрическая станция с установленной мощностью 1 МВт – одна из самых крупных на Дальнем Востоке и единственная такой мощности за Полярным кругом. Батагайская СЭС внесена в Книгу рекордов, как самая северная станция. Оборудование станции рассчитано на работу в экстремальных климатических условиях, когда температура летом поднимается до +45 °С, а зимой падает до –50 °С. Экономия дизельного топлива за пять месяцев эксплуатации солнечной станции составила 61,3 тонн или 3,5 млн руб. По проектным данным годовая экономия дизельного топлива составляет 300 тонн.

Второй перспективный ресурс ДФО – ветер, валовый потенциал которого составляет 535 839 млн т.у.т., технический 839,6 млн т.у.т., экономический 4,20 млн т.у.т. В Хабаровском крае перспективными территориями для использования энергии ветра являются побережья Охотского моря и Татарского пролива, долина реки Амур. В настоящее время в Хабаровском крае смонтировано более 500 ВЭУ разной мощности, которые используются для обеспечения электроэнергией удаленных от центрального электроснабжения объектов – лесозаготовительных, охотничьих и фермерских хозяйств, метео- и телекоммуникационных станций и геологических партий. В Приморском крае действует всего одна ветровая электростанция на острове Попова (в заливе Петра Великого) с суммарной мощностью 23 МВт. В других регионах края ветровая энергия не используются, даже во Владивостоке с его средней годовой скоростью ветра 5 м/с.

Удельная мощность ветроэнергетических ресурсов Якутии изменяется от 3 в континентальной части до 476 Вт/м$^2$ на побережье моря Лаптевых. По предварительным оценкам, на территории Якутии, где среднегодовая скорость ветра достигает 4 м/с, потенциальные запасы энергии ветра составляют 15,6 млрд кВт·ч/год (Лукутин, Киушкина, 2006). В настоящее время в Якутии действует одна экспериментальная ветровая электростанция в поселке Тикси (Бердин и др., 2017).

Большим ветровым потенциалом обладает полоса береговой линии полуострова Камчатка (74,4 тыс. МВт или 63 164 млрд кВт•ч в год). В настоящее время на Камчатке введены в строй два ветродизельных комплекса и ВЭС. Ветродизельные комплексы установлены на Чукотке, Командорских островах и Сахалине.

Огромные расстояния между районами округа и населенными пунктами стали причиной того, что на Дальнем Востоке не было создано единой энергосистемы (как в Европейской части или Сибири). На территории ДФО автономно действуют четыре крупных энергообъединения – энергосистемы Камчатки, Магадана, Сахалина и Чукотки. Амурская область, Еврейская автономная область, Хабаровский край и Якутия формируют объединенную энергосистему Востока.

В последние годы экономика Дальнего Востока заметно растет, и на этом фоне энергетическая отрасль нуждается в серьезной модернизации, поскольку электросетевое хозяйство Дальнего Востока характеризуется сильной изношенностью и является уязвимым местом энергетики. Слабая освоенность территорий, недостаток транспортной инфраструктуры, экстремальные климатические условия – все это усложняет эксплуатацию и проектирование ЛЭП.

По данным энергоуправлений, входящих в объединенную энергосистему Востока, аварии на ЛЭП, обусловленные гололедно-изморозевыми отложениями и ветром, наблюдаются ежегодно. За последние 30 лет также наблюдается некоторый рост числа явлений, связанных с ветром, гололедом и грозами, которые наносят ущерб.

Согласно СП «Нагрузки и воздействия (2016)», на территории ДФО выделяются все районы по гололедным нагрузкам от I до V (особо опасного). Наиболее значительные отложения отмечаются на побережье морей. Однако большая часть территории ДФО отнесена к горным и малоизученным районам. Это связано с тем, что на Дальнем Востоке редкая сеть метеостанций, что затрудняет изучение гололедного и ветрового режимов. На территории ДФО наблюдаются значительные по величине гололедные отложения, расчетные значения которых превышают нормативы, определенные в СП «Нагрузки и воздействия (2016)» и «Правилах устройства электроустановок» (2003).

В 2020 году по данным ПАО «Сахалинэнерго» в Сахалинской области зафиксировано несоответствие фактических климатических условий и значений, заложенных в проекты высоковольтных линий. Была зафиксирована толщина стенки гололеда 40 мм и скорость ветра 40 м/с при заложенных в проекте толщине 10 мм и скорости 37 м/с.

***Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство.*** Современные и будущие изменения климата оказывают существенное воздействие на функционирование в регионе коммунальной энергетики, занимающей центральное место в системе ЖКХ. В зимний сезон на территории округа ожидается значительное повышение

средней температуры отопительного периода. Наибольшие изменения, достигающие к середине XXI века 5 °С, ожидаются на прибрежных территориях арктических морей (рис. 3.1.8.5в). При этом относительные изменения величины градусо-суток отопительного периода варьируют на территории округа в пределах 10-20%, достигая максимальных значений в его северо-восточной части (рис. 3.1.8.5г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления в холодный период года.

В то же время в летний сезон в южных районах округа (в Приморском крае, на юге Хабаровского края, в Еврейской автономной области и Амурской области) ожидается значимое увеличение такого показателя как дефицит холода (рис. 3.1.8.5е), свидетельствующее о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. На фоне сравнительно слабого увеличения дефицита тепла ожидаются периоды пиковой нагрузки на энергосистемы, связанные с длительными периодами экстремально-высоких температур (рис. 3.1.8.5д).

В зимний сезон в южных районах федерального округа (в Бурятии, Забайкальском крае, Амурской области, Приморье и на юге Хабаровского и Камчатского краев) уже в настоящее время наблюдается неблагоприятная тенденция к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, которая приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Изменение режима атмосферных осадков на территории федерального округа негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 3.1.8.6а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов в холодный сезон будет также оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Рост экстремальности осадков на территории округа будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 3.1.8.6в, г). Такие изменения могут привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С (рис. 3.1.8.5а) и увеличение продолжительности теплого сезона создадут более благоприятные условия для проведения работ и уменьшат время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

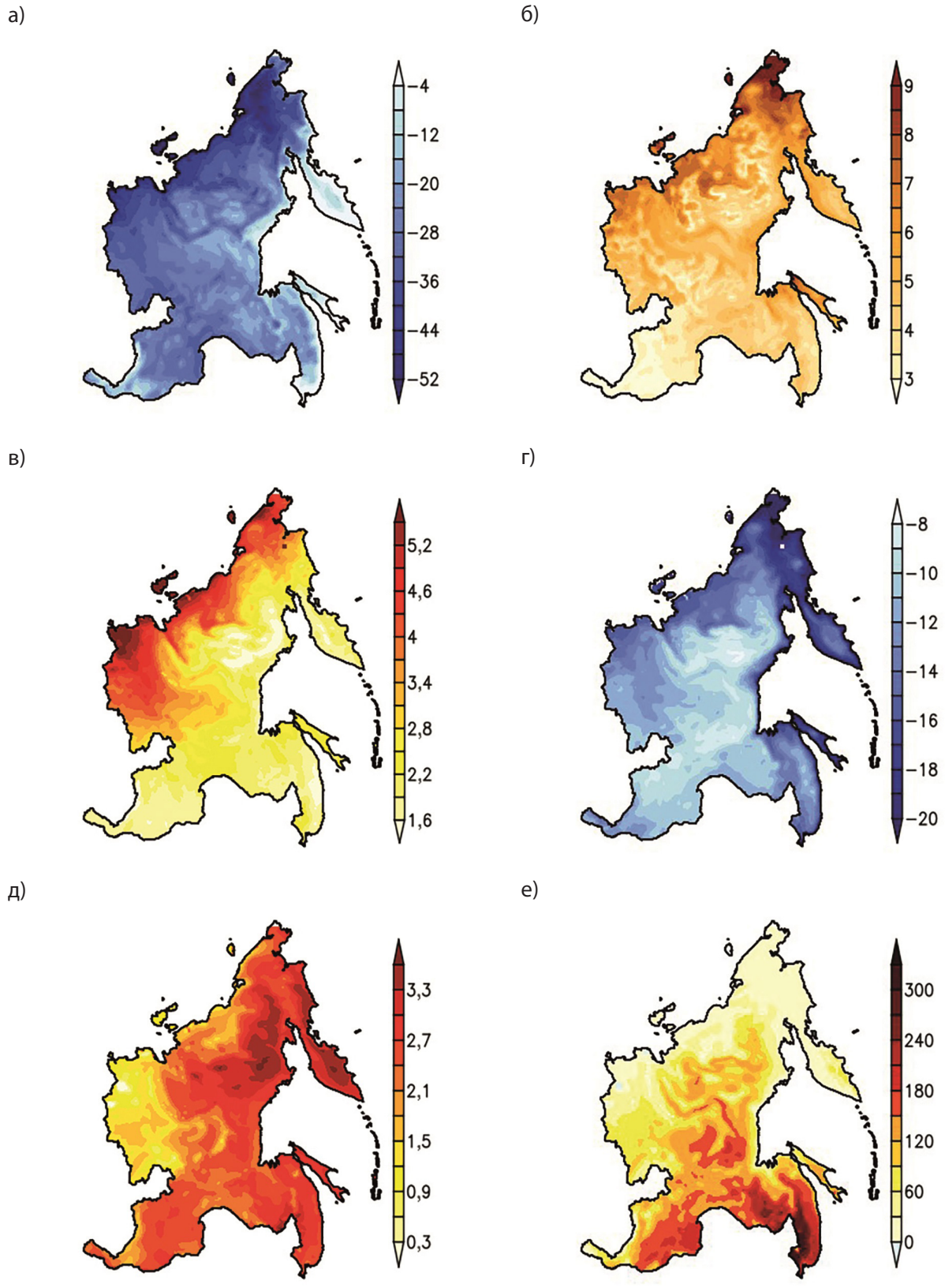



***Рис. 3.1.8.5*** *Изменение специализированных показателей термического режима на территории ДФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (дни); б) температура наиболее холодной пятидневки (°С); в) средняя температура отопительного периода (°С); г) градусо-сутки отопительного периода (%); д) температура наиболее жаркой 30-дневки (°С); е) дефицит холода (°С•сут.). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 3.1.8.5б, д). Специальное внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

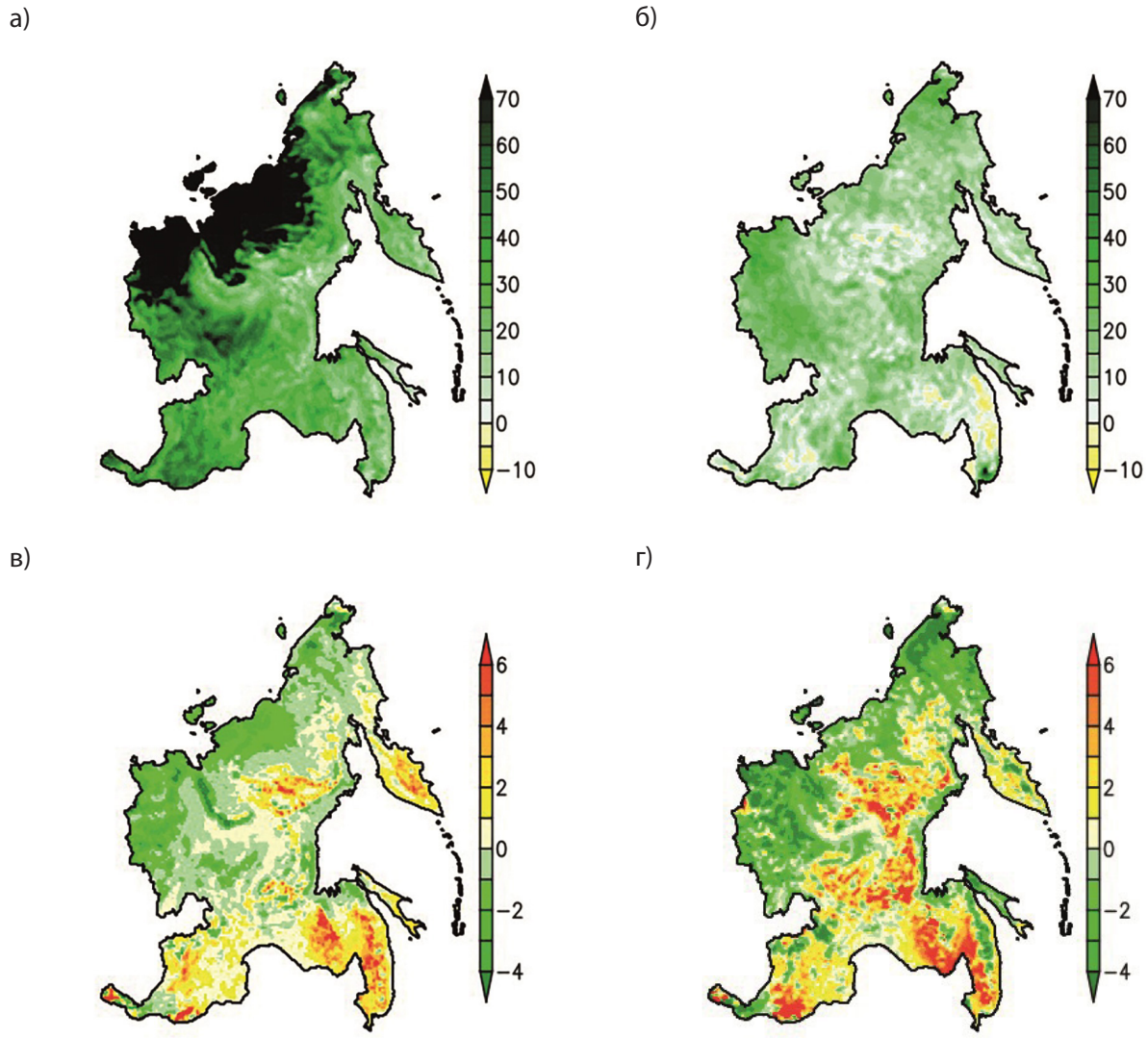



***Рис. 2.1.8.6*** *Изменение специализированных показателей режима увлажнения на территории ДФО в 2050-2059 гг. по отношению к 1990-1999 гг.: а) суточный максимум осадков холодного сезона (%); б) суточный максимум осадков теплого сезона (%); в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сутки для теплого сезона (дни); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сутки для теплого сезона (дни). Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК*

***Туризм.*** На территории ДФО расположено пять туристско-рекреационных районов: Якутский (Республика Саха), Колымско-Чукотский (Магаданская область и Чукотский национальный округ), Камчатский (Камчатская область), Амурско-Дальневосточный (Амурская область,

Хабаровский и Приморский края) и Амурско-Дальневосточный, островной (Сахалинская область и Курилы).

Уникальная природа, многочисленные исторические и культурные памятники создают все условия для развития индустрии туризма и отдыха на Дальнем Востоке. Приоритетным направлением развития туристической отрасли является, прежде всего, экологический туризм, т.к. природа Дальнего Востока исключительно ранима и экотуризм – наиболее подходящий здесь вид путешествий. Основой для его развития являются 25 заповедников (в том числе три объекта всемирного природного наследия ЮНЕСКО – Ленские столбы, горы Центрального Сихотэ-Алиня и вулканы Камчатки). Вторым по значимости является лечебно-рекреационное направление: минеральные источники, лечебные грязи, геотермальные источники создают уникальные возможности для развития лечебно-оздоровительного отдыха. В регионе, как нигде более, развиты и такие специализированные виды туризма, как охота и рыбалка в чистейших водоемах Якутии, Магаданской области, на Чукотке, на Сахалине и, конечно, в Камчатской области. В Приморье, на Сахалине и на Камчатке активно развивается круизный туризм, а удаленные от побережья регионы предлагают сплавы и рафтинг по горным и равнинным рекам. Горный рельеф, снежные зимы способствуют развитию зимнего спорта и туризма: активно развивается горнолыжный туризм. На побережье Японского моря, где песчаные и галечные пляжи в сочетании с теплым морем являются основным рекреационным ресурсом территории, складываются комфортные условия для пляжного туризма.

Сегодня туристическая отрасль Дальнего Востока не в полной мере реализует свой потенциал. Доля туризма в валовом региональном продукте составляет всего 1-2% и менее. Среди причин низкого уровня развития туризма в регионе следует назвать слабую транспортную доступность и суровость климата на значительной части территории округа и которые ограничивают, прежде всего, оздоровительный отдых. Неблагоприятные климатические условия не только не будут способствовать процессу лечения, но и могут вызвать отрицательные сдвиги в здоровье ослабленных людей (Григорьева, Фетисов, 2009).

Для летних видов спортивно-оздоровительного отдыха продолжительность благоприятного периода, которая определяется как период с комфортными и субкомфортными температурами, длится в среднем от трех месяцев на севере Якутии, в Магаданской области и на Чукотке до пяти и более в Приморье и на Сахалине. Однако душные и сухие дни, погода с осадками и т.д. сокращают этот период иногда более, чем на 40% (Григорьева, Фетисов, 2009).

Так пляжный отдых на побережье Охотского моря существенно зависит от режима осадков, суммы которых в летние месяцы составляют здесь 50% годовых, а число дней с осадками более 5 мм продолжаются в среднем от 10 до 15 дней в каждом летнем месяце. С большим количеством осадков в летний период связано выраженное бимодальное распределение индекса комфортности туризма (см. раздел 2.3.10) с максимумами в мае и сентябре.

Зимние виды спорта зависят от высоты и длительности залегания устойчивого снежного покрова. Наилучшие условия для зимних видов рекреации в ДФО складываются на Камчатке, юге Сахалина, в Хабаровском крае, Еврейской автономной области. Длительный сезон с высо-

ким уровнем снежного покрова и не слишком суровый климат создают здесь все условия для развития горнолыжной рекреации.

В целом прогноз климатических условий на середину столетия в ДФО благоприятный: смягчение суровости зимнего периода (рис. 3.1.8.5б), положительный тренд числа дней с комфортными температурами, ожидаемое уменьшение на 10-12% количества атмосферных осадков теплого периода к середине XXI века в Приморье (рис. 3.1.8.6б) и их рост в зимнее время – все это будет дополнительным стимулом для интенсификации развития туризма в регионе.

С изменением климата для отрасли вырастут и риски. Так, в будущем возможны рост уровня пожароопасности в Забайкальском и Хабаровском краях (несет угрозу природным объектам, служащим основным ресурсом экотуризма), повышение вероятности увеличения популяции клещей, повышение повторяемости опасных явлений, таких как сильные снегопады и штормовые ветры, ограничивающие как зимние, так и водные виды рекреации.

***Направления адаптации.*** Для адаптации видов и экосистем тундровых биомов в ДФО можно использовать меры, аналогичные тем, которые предложены для СЗФО и УФО, для адаптации лесных биомов –для ЦФО, СЗФО и СФО, а степных и горных – аналогичные предложенным для ЮФО и СКФО. Чрезвычайно важен контроль инвазивных видов.

Ожидаемое увеличение водности рек на большей части территории ДФО повышает риски затопления их прибрежных территорий и требует проведения адаптационных мероприятий по обеспечению безопасности населения и объектов экономики. Необходима актуализация правил использования водных ресурсов Иркутского водохранилища в целях безусловного сохранения уникальной экосистемы озера Байкал и минимизации ущербов при значительных изменениях его уровня.

В целях адаптации сельского хозяйства возможно увеличение площадей озимых культур, благодаря улучшению условий перезимовки, а также расширение посевов риса и сои в связи с ростом тепловых ресурсов. Повышение интенсификации производства (использование удобрений, химических средств защиты растений, семенного материала высоких репродукций) также один из эффективных путей адаптации к изменениям климата в регионе.

В горнодобывающей отрасли требуется осуществление работ по геотехническому мониторингу криолитозоны в комплексе с анализом метеорологических данных – это позволит охарактеризовать современные изменения температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых грунтов и определить условия и факторы, влияющие на формирование температурного режима грунтов.

Для адаптации транспортной инфраструктуры следует проводить мониторинг состояния автомобильных дорог общего пользования, проходящих по территории распространения многолетнемерзлых грунтов в пределах криолитозоны. Необходимо привести в нормативное состояние искусственные сооружения на дорогах, находящихся в зоне потенциального подтопления. В Приморском и Хабаровском краях и на Сахалине требуется обеспечение большей устойчивости железнодорожной сети к воздействию обильных осадков (например, путем укрепления откосов, использования противоразмывных сооружений), сильных ветров

(например, путем установки ветрозащитных ограждений и экранов, использования ветрозащитных лесонасаждений).

В энергетической отрасли необходим детальный учет наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических, гидрологических, геокриологических характеристик при строительстве новых энергетических мощностей и модернизации уже действующих электростанций и ЛЭП. Целесообразно дальнейшее совершенствование систем мониторинга и оповещения об опасных гидрометеорологических ситуациях, улучшение планирования противопожарных мероприятий (прежде всего, меры по профилактике лесных пожаров и восстановлению лесов). Альтернативные источники энергии (малая гидроэнергетика, ветер, солнце, биомасса и местные виды топлива) позволят решать проблему районов с децентрализованным электроснабжением.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства и строительства в южных районах ФО (в Приморском крае, на юге Хабаровского края, в Еврейской АО и Амурской области) необходимо повышение уровня инженерного обеспечения зданий, обеспечивающее поддержание оптимального микроклимата в помещениях с учетом роста экстремальных температур и энергопотребления в летний сезон. В зимний сезон на юге ФО для уменьшения влияния температурно-влажностных деформаций на ускоренное старение зданий важно обеспечить при строительстве новых объектов использование материалов, имеющих надлежащую стойкость в отношении циклов замораживания и оттаивания и повышенную коррозийную устойчивость различных элементов. Рост суточных экстремумов осадков на всей территории ФО может привести к необходимости модернизации систем водоотведения на основе обновленных нормативных параметров интенсивности осадков. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при выборе жесткости критериев и задании нормативных значений различных атмосферных нагрузок и характеристик экстремальности необходимо опираться на результаты анализа рисков критических воздействий с учетом информации о современных и будущих климатических изменениях в течение всего расчетного периода эксплуатации проектируемого объекта.

Для адаптации туристской деятельности в регионе необходимы разработка и внедрение механизмов устойчивого развития туризма. Прогнозируемое сокращение количества летних осадков и рост температуры теплого периода в Приморье благоприятны для развития пляжного туризма и курортно-санаторных учреждений, что потребует как обновления инфраструктуры, так и подготовки кадров. Рост количества осадков зимнего периода предполагает развитие зимних видов рекреации на Камчатке, юге Сахалина, в Хабаровском крае и в Еврейской АО.

*При подготовке раздела 3.1 в части природных экосистем и баланса почвенного углерода были использованы материалы, предоставленные М. Д. Ананичевой, А. П. Андреевой, В. Ю. Вертянкиной, А. С. Калугиным, И. Н. Кургановой, А. А. Сириным, А. В. Чернокульским, С. С. Чернянским.*

## Список литературы


**Алейников А. А., Липка О. Н., 2016:** Тающие горы Дагестана. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2016. – 108 с.

**Алферов А. М., Блинов В. Г., Гитарский М. Л., Грабар В. А., Замолодчиков Д. Г., Зинченко А. В., Иванова Н. П., Ивахов В. М., Карабань Р. Т., Карелин Д. В., Калюжный И. Л., Кашин Ф. В., Конюшков Д. Е., Коротков В. Н., Кровотынцев В. А., Лавров С. А., Марунич А. С., Парамонова Н. Н., Романовская А. А., Юзбеков А. К., 2017:** Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит. – 279 с.

**Ананин А. А., 2019:** Влияние долговременных климатических изменений на динамику населения птиц в горах Северо-Восточного Прибайкалья / В сб.: Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. С. А. Куролап, Л. М. Акимов, В. А. Дмитриева (ред.) – Воронеж: Цифровая полиграфия. –Т. 2. – С. 18-22.

**Ананичева М. Д., Пакин Г. Ю., Абрамов А. А., Кононов Ю. М., 2019:** Загадочные ледники Прибайкалья: итоги экспедиций // ХолодОк. –№ 1 (17). – С. 37-45.

**Анисимов О. А., Стрелецкий Д. А., 2015:** Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов. Арктика. XXI век // Естественные науки. – № 2 (3). – С. 60-74.

**Антонов А. И., Яковлев А. А., Подольский С. А., Костин Б. Г., 2016:** К фауне птиц верховьев Зеи (Амурская область) // Фауна Урала и Сибири. – № 2. – С. 21-33.

**Арутюнов А. Л., 2010:** О перспективах использования основных и альтернативных видов топлива в сельскохозяйственном производстве России // Проблемы прогнозирования. – № 3. – С. 82-92.

**Асварова Т. А., Гасанов Г. Н., Гаджиев К. М., Баширов Р. Р., Гимбатова К. Б., Абдулаева А. С., Кичева Ж. О., 2021:** Запасы азота и углерода в почвах Терско-Кумской низменности // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – № 3. – С. 33-40.

**Атаев З. А., 2016:** Федеральные округа России: Условия для развития возобновляемой энергетики // Проблемы безопасности российского общества. – № 1. – С. 137-145

**Аухадеев Т. Р., Переведенцев Ю. П., 2016:** Ветроэнергетический потенциал Приволжского федерального округа // Российский журнал прикладной экологии. – № 1 (5). – С. 3-7.

**Баженов Ю. А., 2019:** Население мелких млекопитающих окрестностей Торейских озер (юго-восточное Забайкалье) в период сухой климатической фазы: динамика и связь с осадками // Сибирский экологический журнал. – Т. 26, № 1. – С. 29-41.

**Балонишникова Ж. А., 2021:** Водные ресурсы регионов России для устойчивого экономического развития и гарантированного водообеспечения населения / В сб.: Водная драма в условиях глобальных трансформаций. Трехсторонний диалог по инновационной водной дипломатии и эффективному управлению водными ресурсами XXI века. – Москва-Женева. – С. 66-68.

**Баранов А. А., Воронина К. К., 2016:** Причины и основные тенденции динамики ареалов птиц на территории Средней Сибири / В сб.: География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: материалы XI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному Дню Земли и 100-летию заповедной системы России – Красноярск. – С. 93-97.

**Баранская А. В., Романенко Ф. А., Арсланов Х. А., Петров А. Ю., Максимов Ф. Е., Пушина З. В., Тихонов А. Н., Демидов Н. Э., 2018:** Верхнечетвертичные отложения Гыдана и арктических островов: реконструкция относительного уровня Карского моря в связи с вертикальными движениями земной коры за последние 50 тысяч лет // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. – № 6. – С. 56-71.

**Барашов Н. Г., Домов Н. Г., 2020:** Оценка и прогноз перспектив развития внутреннего туризма в регионах ПФО. Барашов Р. Г. Актуальные проблемы и перспективы развития государственной статистики в современных условиях: Сборник докладов Международной научно-практической конференции: в 2 томах, Саратов, 20-22 января 2020 года. – ФГБУ «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова». – С. 45-48.

**Бастрон А. В., Тремясов В. А., Цугленок Н. В., Чебодаев А. В., 2015:** Ветроэнергетика Красноярского края – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 252 с.

**Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке-мл. А.Н., Морозова О. В., Покровская И. В., Царевская Н. Г., Тертицкий Г. М., 2016:** «Позеленение» Российской Арктики и современные

тренды изменения ее биоты // Известия РАН, серия геогр. – № 3. – С. 28-39.

**Бердин В. Х., Кокорин А. О., Юлкин Г. М., Юлкин М. А., 2017:** Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики – М., Всемирный фонд дикой природы (WWF). – 80 с.

**Бисикалова Е. А., 2018:** Влияние природно-климатических факторов на дендрофенологию в заповеднике «Кедровая падь» / В сб.: Летопись природы России: фенология – Великие Луки, Великолукская типография. – С. 26-35.

**Бобрецов А. В., Смирнов Н. С., Тертица Т. К., 2018:** Фенологичсекие реакции растений и животных на изменчивость климата в Северном Предуралье (Печоро-Илычский заповедник) /В сб.: Летопись природы России: фенология – Великие Луки: ООО «Великолукская типография». – С. 36-42.

**Бобрик А. А., Рыжова И. М., Гончарова О. Ю., Матышак Г. В., Макаров М. И., Волкер Д. А., 2018:** Эмиссия CO2 и запасы органического углерода в почвах северотаежных экосистем Западной Сибири в различных геокриологических условиях // Почвоведение. – № 6. – С. 674-682.

**Брыксина Н. А., Полищук Ю. М., 2015:** Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. – Т. 19, № 2. – С. 114-120.

**Буйволов А. И., Фомин Б. Н., 2020:** Анализ трендов сезонного развития растений Приокско-Террасного заповедника по фенологическим данным /В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 188-193.

**Буйволов Ю. А., Благушин В. В., Соколова Г. В., Delgado M. M., 2018:** Фенологические отклики сосудистых растений Приокско-Террасного биосферного заповедника / В сб.: Летопись природы России: фенология – Великие Луки, Великолукская типография. – С. 43-50.

**Ваганов Е. А., Ведрова Э. Ф., Верховец С. В., Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Круглов В. Б., Онучин А. А., Сухинин А. И., Шибистова О. Б., 2005:** Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. – № 4. – С. 631-649.

**Ведрова Э. Ф., Ваганов Е. А., 2009:** Углеродный бюджет бореальных лесов Средней Сибири // Доклады Академии наук. – Т. 425, № 5. – С. 678-682.

**Викулина М. А., Зимин М. В., Романенко Ф. А., 2021:** Динамика малых форм оледенения в Хибинах в связи с изменением климата / Материалы Общероссийской научно-практической конференции: Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях – М.: Геомаркетинг. – С. 54-58.

**Водные ресурсы России и их использование, 2008:** / под ред. И. А. Шикломанова – СПб., Государственный гидрологический институт. – 600 с.

**Волков С. В., Свиридова Т. В., Шариков А.В, 2018:** Прямое и опосредованное влияние изменений климата на птиц / В сб. Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 61.

**Газиев С. А., 2017:** Плодородие пахотных почв Чеченской Республики // Агрохимический вестник. – № 5. – С. 25-28.

**Гайсин И. К., Моисеев П. А., Махмутова И. И., Низаметдинов Н. Ф., Моисеева О. О. 2020:** Экспансия древесной растительности в экотоне лес-горная степь на Южном Урале в связи с изменениями климата и влажности местообитаний // Экология. – № 4. – С. 251-264

**Галахов В. П., Самойлова С. Ю., Коломейцев А. А., Мардасова Е. В., Шевченко А. А., Шереметов Р. Т., 2019:** Влияние глобального потепления на ледниковый сток (по исследованиям в бассейне Актру: 1952-2012) // Известия АО РГО. – Т. 52, № 1. – С. 37-45.

**Галиуллина, Ю.В., 2018:** Многолетняя динамика речного стока и его изменчивость по бассейнам рек Белая и Урал (в пределах Республики Башкорстостан). Геология, география и глобальная энергия. – № 2 (69). – С. 136-143.

**Гедгафова Ф. В., Горобцова О. Н., Улигова Т. С., Темботов Р. Х., Хакунова Е. М., 2019:** Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв Центрального Кавказа // Агрохимия. – № 4. – С. 23-30.

**Георгиев А. П., 2014:** Трансформация ихтиофауны оз. Водлозеро (Карелия) в условиях изменения климата // Рыбное хозяйство. – № 1. – С. 67-69.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2019:** Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. – № 11. – С. 46-55.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2018:** Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. – № 10. – С. 8-16.

**Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г., 2020:** Условия формирования катастрофического паводка 2019 года на реке Ие и оценка его характеристик // География и природные ресурсы. – № 4. – С. 86-94.

**Гировка Н. Н., 2015:** Туристско-рекреационные ресурсы территорий: предпосылки формирования – Нижний Новгород: Нижегородский. государственный. архитектурно-строительный университет. – 294 с.

**Глазовский А. Ф., Носенко Г. А., Цветков Д. Г., 2005:** Ледники Урала: современное состояние и перспективы // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 98. – С. 207-214.

**Годунова Е. И., Шаповалова Н. Н., Кулинцев В. В., Хрипунов А. И., Шкабарда С. Н., 2017:** Состояние плодородия почв Ставрополья и пути достижения их нуль-деградации в современных климатических условиях // Агрохимический вестник. – № 5. – С. 7-11.

**Головацкая Е. А., Никонова Л. Г., 2013:** Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного. университета. Биология. – № 3. – С. 137-151.

**Гончарова О. Ю., Матышак Г. В., Тимофеева М. В., Сефилян А. Р., Бобрик А. А., Тархов М. О., 2019:** Автотрофное и гетеротрофное дыхание почв криолитозоны: оценка вкладов и методические подходы (на примере почв севера Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. – № 6. – С. 654-667.

**Григорьев А. А., Дэви Н. М., Кукарских В. В., Галимова А. А., Вьюхин С. О., Моисеев П. А., Фомин В. В., 2019:** Структура и динамика древостоев вехней границы леса в западной части плато Путорана / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 177-178.

**Григорьева Е. А., Фетисов Д. М., 2009:** Оценка пригодности климта района для спортивно-оздоровительной рекреации // Медицинская экология. – № 6. – С. 211-216.

**Двинин Д. Ю., 2012:** Эколого-экономические преимущества альтернативной электроэнергетики в Уральском и Приволжском федеральных округах России //. Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. ISSN 1999-2645. № 2 (54). Номер статьи: 5410. 1. Биоэнергетика России в XXI веке. Российское энергетическое агентство, Москва.

**Двинин Д. Ю., 2019:** Характеристика материальной интенсивности альтернативной энергетики в регионах Российской Федерации // Вестник Евразийской науки. – Т. 11, № 2. – С. 1-9.

**Десяткин Р. В., 2018:** Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны северного полушария // Вестник РАН. – Т. 88, № 12. – С. 1113-1121.

**Дзахмишева И. Ш., Акбашева А. А., 2017:** Анализ состояния почвенного плодородия в Карачаево-Черкесской Республике / В сб.: Scientific achievements of the third millennium. Collection of scientific papers on materials VI International Scientific Conference. – International Research Federation «Science Public». – С. 11-15.

**Довгополая Е. А., Широких А. Д., 2015:** Система показателей эффективности использования земель Южного федерального округа // Экономика и экология территориальных образований. – № . 3. – С. 145-149

**Дымов А. А., Дубровский Ю. А., Габов Д. Н., Жангуров Е. В., Низовцев Н. А., 2015:** Влияние пожара в северотаежном ельнике на органическое вещество почв // Лесоведение. – № 1. – С. 52-65.

**Дымов А. А., Милановский Е. Ю., 2014:** Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга республики Коми) // Почвоведение. – № 1. – С. 39-47.

**Дюкарев Е. А., Головацкая Е. А., 2008:** Моделирование углеродного баланса болотных экосистем Южной тайги при различных сценариях изменения климата // Вычислительные технологии. – Т. 13. – С. 130-135.

**Жильцова Е. Л., Анисимов О. А., 2015:** Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // Арктика XXI век, серия естественные науки. – № 2 (3). – С. 48-59.

**Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Честных О. В., 2018:** Динамика баланса углерода в лесах федераль-

ных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки. – Т. 1 (1), № . 1. – С. 1-24, DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24

**Замолодчиков Д. Г., Краев Г. Б., 2018:** Влияние изменения климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. – № 4 (48). – С. 23-31.

**Замотайлов А. С., Сердюк В. Ю., Хомицкий Е. Е., Белый А. И., 2019:** Новые данные о распространении и биологии некоторых редких видов жужелиц (Coleoptera, Carabidae) на юге России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – Т. 4, № 4. – С. 81-90.

**Заурбеков Ш. Ш., Бекмурзаева Л. Р., Оздиева Т. Х., 2017:** Анализ селевой активности Чеченской республики в связи с изменениями климата // Известия Дагестанского государственного Педагогического университета. Естественные и точные науки. – Т. 11, № 2. – С. 76-82.

**Зорина А. А., Шуйская Е. А., Куракина И. В., Огурцов С. С., Степанов С. Н., 2018:** Компоненты изменчивости наступления феноявлений в Центрально-Лесном заповеднике / В сб.: Летопись природы России: фенология – Великие Луки, Великолукская типография. – С. 43-50.

**Иванов А. В., Браун М., Замолодчиков Д. Г., Лынов Д. В., Панфилова Е. В., 2018:** Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений Южного Приморья // Почвоведение. – № 3. – С. 297-303.

**Иванов А. Н., Моисеев А. И., 2020:** Сопряженный анализ летописей природы и климатических рядов островных заповедников Дальнего Востока / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 15-21.

**Игнатьева А. В., Кнауб Р. В., 2020:** Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исследования. – № 1. – С. 66-77. DOI 10.17223/25421379/14/5

**Кадулин М. С., Копцик Г. Н., 2021:** Изменения потока диоксида углерода из почв лесных экосистем под воздействием техногенного загрязнения в Кольской Субарктике // Почвоведение. – № 10. – С. 1281-1292.

**Калабина М. В., Зворыкина Ю. В., 2019:** О проявлениях глобальных изменений климата в Арктике // Российская энергетика и энергосбережение. – № 5-6. – С. 38-42.

**Карелин Д. В., Горячкин С. В., Кудиков А. В., Лопес де Гереню В. О., Лунин В. Н., Долгих А. В., Люри Д. И., 2017а:** Изменение запасов углерода и эмиссии $CO_2$ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. – № 5. – С. 580-594.

**Карелин Д. В., Люри Д. И., Горячкин С. В., Лунин В. Н., Кудиков А. В., 2015:** Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. – № 11. – С. 1354-1366.

**Карелин Д. В., Почикалов А. В., Замолодчиков Д. Г., 2017б:** Эффект усиления эмиссии $CO_2$ в окнах распада лесов Валдая // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – № 2. – С. 60-68.

**Каримова М. Е., Зануздаева Н. В., Поликарпова Н. В., Воробьева Н. Г., 2019:** Реакция фенологических фаз иван-чая узколистного Chamaenerion angustifolium на изменения климата в заповедниках Мурманской области / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 180-181.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Керимов А. М., Гегиев К. А., Анаев М. Т., Гергокова З. Ж., 2018:** Изменение селевой активности в бассейне реки Черек-Безенгийский в связи с интенсивной деградацией оледенения // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – Т. 3, № 2(10). – С. 43-48.

**Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратов (и др.) под ред. В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой и Г. В. Сидоренко** – СПб: Наука, 2010. – 235 с.

**Князев Н. В., Исаева Л. Г., 2019:** Лесные пожары в Мурманской области и возникновение пожаров от гроз /

В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 49-50.

**Козлов М. В., Зверев В. Е., Хантер М. Д., Зверева Е. Л., 2019:** Реакции насекомых-фитофагов на одновременные изменения уровня загрязнения и климата: результаты долгосрочных наблюдений / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 183-185.

**Кондратьева О. Е., Мясникова Е. М., Локтионов О. А., Воронков Д. А., 2019:** Выявление климатических факторов, влияющих на надежность воздушных линий электропередачи В сб.: Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. – Юго-Западный государственный университет. – С. 373-377.

**Конторщиков В. В., 2018:** Расширение ареала черноголовой гаички на северо-восток / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 156-157.

**Копцик Г. Н., Куприянова Ю. В., Кадулин М. С., 2018:** Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода почвами в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ им. М. В. Ломоносова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – № 2. – С. 40-47.

**Корсакова С. П., Корсаков П. Б., Багрикова Н. А., 2020:** Климатогенные изменения и прогноз сроков пыления Junipenis deltoides (Cupressaceae) // Наука Юга России. – Т. 16, № . 3. – С. 40-52.

**Котико В. В., Фарков А. Г., 2013:** Потенциал развития возобновляемых источников энергии в аграрных регионах Западной Сибири // Экономика и природопользование. –№ 15 (294). – С. 14-20.

**Котляков В. М., Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Попова В. В., Чернова Л. П., Муравьев А. Я., Рототаева О. В., Никитин С. А. Зверкова Н. М., 2015:** Современные изменения ледников горных районов России – М., Товарищество научных изданий КМК. – 288 с.

**Кочанов А. С., 2018:** Современные изменения в фауне и населении птиц Европейского Северо-Востока России и определяющие их факторы / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 165-166.

**Кузнецова Н. Ф., Сауткина М. Ю., 2019:** Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесоведение и лесоводство. – № 2. – С. 26-44.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Аблеева В. А., Быховец С. С., 2017:** Климат южного Подмосковья: современные тренды и оценка экстремальности // Фундаментальная и прикладная климатология, № 4. – С. 62-78.

**Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Хорошаев Д. А., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Жмурин В. А., Кудеяров В. Н., 2020:** Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. – № 10. – С. 1220-1236. DOI: 10.31857/S0032180X20100111.

**Лаврентьев И. И., Петраков Д. А., Кутузов С. С., Коваленко Н. В., Смирнов А. М., 2020:** Оценка потенциала развития ледниковых озер на Центральном Кавказе // Лед и Снег. – Т. 60, № 3. – С. 343-360.

**Либеровская А. Н., Джумагазиев Е. Г., 2020:** Опустынивание агроландшафтов Южного федерального округа // Инновационное развитие строительного комплекса региона: задачи, состояние, перспективы. – С. 115-117.

**Липкович А. Д., 2018:** Многолетние тренды численности и динамика сроков гнездования редких видов околоводных птиц озера Маныч-Гудило / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 180-181.

**Литвинчук С. Н., 2017:** Распространение и природоохранный статус малоазиатского тритона, Ommatotriton ophryticus (Amphibia: Caudata), Nature Conservation Research // Заповедная наука. – Т. 2, № 1. – С. 33-39.

**Лукашева М. А., 2020:** Влияние климатический изменений на фенологию растений и животных Алтайского государственного заповедника / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата.

Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 58-63.

**Лукутин Б. В., Киушкина В. Р., 2006:** Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии – Томск, Изд. ТПУ. – 202 с.

**Лурье П. М., Панов В. Д., 2014:** Изменение современного оледенения северного склона Большого Кавказа в XX в. и прогноз его деградации в XXI в. // Метеорология и гидрология. – № 4. – С. 68-76.

**Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Меняйло О. В., Верховец С. В., Тычков И. И., Урбан А. В., Рубцов А. В., Кошурникова Н. Н., Ваганов Е. А., 2020:** Влияние климатических факторов на эмиссию $CO_2$ из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири // Экология. – № 1. – С. 51-61.

**Махов С. Ю., 2013:** Оценка рекреационных систем. МОО –М.: «Академия безопасности и выживания». – 210 с.

**Маштаков Д. А., Автономов А. Н., Проездов П. Н., 2018:** Концепция создания противоэрозионных защитных лесных насаждений в лесостепи приволжской возвышенности // Успехи современного естествознания. – № 6. – С. 37-42.

**МГЭИК, 2014:** Изменение климата, 2014 г. Воздействия, адаптация и уязвимость. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: ВМО. – 40 с.

**Мельников Ю. И. 2019:** Динамика фауны куликов котловины озера Байкал и ее связь с современными изменениями климата (конец XVIII -начало XXI в.) // Природа внутренней Азии. – № 1. – С. 28-54.

**Мельников Ю. И., 2018:** Особенности современной динамики фауны птиц и климата котловины озера Байкал / В сб.: Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 200-201.

**Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, 2021.** Утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021 г.)

**Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, 2017.** Утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021 г.)

**Минин А. А., Ранькова Э. Я., Буйволов Ю. А., Сапельникова И. И., Филатова Т. Д., 2018:** Фенологические тренды в природе центральной части Русской равнины в условиях современного потепления // Жизнь Земли. – Т. 40, № 2. – С. 162-174.

**Минтопэнерго России, 1994:** Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России / Ю. К. Шафранник, В. В. Бушуев, П. П. Безруких и др. – М.: 95 с.

**Минэнерго России, 2009:** Энергетическая стратегия России до 2030 года – М.

**Митропольский М. Г., Мардонова А. Г., 2018:** Динамика ареала сплюшки в Западной Сибири за последнее столетие / В сб. Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов – с. 220-221.

**Моисеев П. А., Гайсин И. К., Бубнов М. О., Моисеева О. О., 2018:** Динамика древесной растительности на участках остепненных склонов Южного Крака в последние 80 лет // Экология. – № 2. – С. 157-162, doi: 10.7868/S0367059718020105

**Моисеев П. А., Галимова А. А., Бубнов М. О., Фомин В. В., Терская А. И., 2019:** Динамика древостоев на верхнем пределе их произрастания на Кольском полуострове в последнем столетье / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 187-188.

**Мошкина Е. В., Мамай А. В., Курганова И. Н., Шорохова Е. В., Ромашкин И. В., Лопес де Гереню В. О., 2021:** Годовая эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы ельника черничного в средней тайге Республики Карелия / В сб.: Заповедники и национальные парки – научно-исследовательские лаборатории под открытым небом: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Петрозаводск, 12-14 октября 2021 г.: научное электронное издание, отв. ред. Н. В. Ильмаст, – Петрозаводск: КарНЦ РАН. – С. 146-148.

**Национальный атлас Арктики, 2017.** – М.: АО «Роскартография». – 496 с.

**Национальный атлас почв Российской Федерации, 2011.** – М.: «Астрель»: АСТ. – 632 с.

**Национальный доклад "Глобальный климат и почвенный покров России:** проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство), 2021. – М., ФГБУ «Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева». – 700 с.

**Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России:** оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)» (под ред. А. И. Бедрицкого), 2018. – М.: ФГБУ «Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева», ГЕОС. – 285 с.

**Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России:** опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)», 2019. Р.С.-Х. Эдельгериев (ред.) – М.: Издательство МБА. – Т. 2. – 476 с.

**Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России:** оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)», 2018 / А. И. Бедрицкий (ред.) – М.: ГЕОС. – 357 с.

**Никольченко Ю. Н., Сухова М. Г., 2013:** Ветроэнергетический потенциал Алтайского края, как составляющая устойчивого развития региона // Вестник ТГУ. – Т. 18., Вып. 2. – С. 666-667.

**Носенко Г. А., Хромова Т. Е., Рототаева О. В., Шахгеданова М. В., 2013:** Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001-2010 гг. на изменения температуры и количества осадков // Лед и Снег. – Т. 53, № 1. – С. 26-33, https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-26-33

**Носкова О. С., 2016:** Десятилетняя динамика гнездового населения птиц хвойно-широколиственных лесов Пустынского заказника (Нижегородская область) // Nature Conservation Research, Заповедная наука. – № 2. – С. 30-37.

**Оборин М. С., Ермакова Л. Н., Баталова А. Г., 2014:** Оценка степени благоприятности погодных условий Приволжского федерального округа для целей рекреации и санаторно-курортного лечения // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – № 2. – С. 162-170.

**Овсепян Л. А., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Русаков А. В., Кузяков Я. В., 2020:** Изменение densитометрического фракционного состава органического вещества почв лесостепной зоны в процессе постагрогенной эволюции // Почвоведение. – № 1. – С. 56-68.

**Павлова В. Н., Караченкова А. А., 2020:** Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // Фундаментальная и прикладная климатология. – № 4. – С. 68-87.

**Панкратьева С. Г., 2019:** Современное состояние и перспективы развития энергетики Хабаровского края // Власть и управление на Востоке России. – № 3 (88). – С. 156-163.

**Петров И. А., 2016:** Оценка воздействия климатических изменений на древесные растения в горах Алтае-Саянского региона – автореферат дис. канд. биол. наук, Новосибирск. – 17 с.

**Петров И. А., Шушпанов А. С., Голюков А. С., Двинская М. Л., Харук В. И., 2021:** Динамика древесно-кустарниковой растительности в горной лесотундре Восточного Саяна // Экология. – Т. 5, № 5. – С. 372-379.

**Поздняков Ш. Р., Иванова Е. В., Лапенков А. Е., Гузева А. В., Ревунова А. В., 2020:** Современное гидрологическое состояние озера Баскунчак // Известия АО РГО. – № 4 (59). – С. 58-67.

**Полищук Ю. М., Куприянов М. А., Брыксина Н. А., 2017:** Дистанционное исследование динамики площади озер в сплошной криолитозоне Сибири // География и природные ресурсы. – № 3. – С. 164-170.

**Помазкина Л. В., Семенова Ю. В., Симакова А. А., Кириллова Н. Н., Башалханов И. А. 2016:** Оценка баланса углерода почв в агроэкоситемах Иркутской области // Агрохимия. – № 5. – С. 65-71.

**Правила устройства электроустановок: 7 изд., 2003 г.** – утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 08.07.02: ввод. в действие с 01.01.03. – М: ОАО «ВНИИЭ», 2003.

**Прокошева И. В.,2017:** Динамика фенологических процессов в горнотаежном поясе Вишерского заповедника (Северный Урал) под влиянием климатических изменений // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Т. 28, № 2. – С. 40-55.

**Прокошева И. В., 2018:** О связи осенних фенологических фаз у березы (Betula pubescens) с климатически-

ми показателями в горнотаежном поясе Вишерского заповедника (Северный Урал) // Летопись природы: фенология. – С. 163-169.

**Промышленные системы охлаждения. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям** – М.: Бюро НДТ. 2016. – 328 с.

**Прощалыкин М. Ю., Сергеев М. Е., 2020:** Новые данные о распространении Apis cerana ussuriensis (Hymenoptera, apidae) в Приморском крае, Россия // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – Т. 5, № 4. – С. 111-112.

**Пуртова Л. Н., Костенков Н. М., Семаль В. А., Комачкова И. В., 2013:** Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья // Фундаментальные исследования. Биологические науки. – № 1. – С. 585-589.

**Пучнина Л. В., 2017:** Состояние популяций Calypso bulbosa и Cypripedium calceolus (Orchidaceae) в Пинежском заповеднике // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – Т. 2, № S1. – С. 125-150.

**Пчелкин А. В., 2020:** Климатозависимая миграционная активность селемджинской популяции сибирской косули / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 142-147.

**Пшегусов Р. Х., Чадаева В. А., Комжа А. Л., 2019а:** Пространственное моделирование распространения и долгосрочная климатогенная динамика видов рода Ambrosia L. на Кавказе // Российский журнал биологических инвазий. – Т. 12, № 4. – С. 94-106.

**Пшегусов Р. Х., Чадаева В. А., Тания И. В., Абрамова Л. М., Мустафина А. Н., 2019б:** Стратегия жизни и долгосрочная климатогенная динамика эндемичного кавказского вида Fritillaria Latifolia Willd // Ученые записки Казанского университета, серия естественные науки. – Т. 161, № 4. – С. 571-589.

**Разумов В. В., А. Г. Колычев, С. И. Шагин, 2012:** Природные опасности в рекреационных зонах Приэльбрусья // ГеоРиск. – № 1. – С. 28-38.

**Робертус Ю. В., Кивацкая А. В., Любимов Р. В., 2014:** Новые данные о балансе углерода Республики Алтай // Известия РАН. Сер. Географическая, № 6. – С. 110-113.

**Рожкова О. Ю., 2018:** Феноклиматическая динамика активности биоты на территории Олекминского заповедника юго-запада Якутии / В сб.: Летопись природы России: фенология – Великие Луки, Великолукская типография. – С. 36-42.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.) – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Самбуу А. Д., Дапылдай А. Б., Куулар А. Н., 2009:** Пул углерода в травяных экосистемах и агроценозах Тувы // Почвоведение и растениеводство. – С. 50-56.

**Санданов Д. В., 2020:** Особенности фенологии раннецветущих растений Бурятии: динамика и климатогенные тренды /. В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 22-27.

**Сапельникова И. И., 2018:** Фенологические исследования в Воронежском заповеднике. В сб.: Летопись природы России: фенология // Великие Луки, Великолукская типография. – С. 43-50.

**Семенов В. М., Когут Б. М., Лукин С. М., 2014:** Влияние повторяющихся циклов высушивания–увлажнения–замораживания–оттаивания на активный пул органического вещества почвы // Почвоведение. – № 4. – С. 443-454.

**Симонов С. А., Матанцева М. В., 2020:** Анализ современного состояния орнитофауны Костомукшского заповедника и Калевальского национального парка (Северо-Запад России) с учетом влияния прилегающих территорий // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – Т. 5, № 3. – С. 51-65.

**Сирин А. А., Макаров Д. А., Гуммерт И., Маслов А. А., Гульбе Я. И., 2019:** Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение, № 5. – С. 410-422.

**Смирнов В. В., Смирнова-Залуми Н.С., Суханова Л. В., Благодетелев А. И., 2015:** О мерах по сохранению ресурсов Байкальского омуля Coregonus migratorius // Вестник рыбохозяйственной науки. – Т. 2, № 4(8). – С. 42-48.

**Смолина С. Г., 2009:** Оценка перспектив развития речного транспорта России на основе прогноза из-

менений стока и морфодинамики гидросети вследствие глобального потепления климата // Труды ИСА РАН. – Т. 4. – С. 221-237.

**Соловьев А. Н., Шихова Т. Г., 2020:** Фенологические отклонения в условиях меняющегося климата / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата: материалы II Международной. научной конференции – М.: Товарищество науч. изд. КМК. – С. 8-14.

**Сорокин А. С., Куст Г. С., 2018:** Диагностика признаков уплотнения в пахотных почвах Заволжья Саратовской области // Вестник Московского государственного университета, сер. 17. Почвоведение, № 1. – С. 3-7.

**СП Нагрузки и воздействия, 2016: Свод правил СП 20.13330.2016.** Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 — М.: Минстрой России, 95с.

**Спицын В. М., Андреев В. А., Потапов Г. С., Розенфельд С. В., 2018**: Современная экспансия и залеты южных видов на север Архангельской области. / В сб. Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 314-315.

**Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Центрального федерального округа на 15.03.2021 г.** Подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00. https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/7b3d9ba6c8bf668640b5ad761911e8fa.pdf

**Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям).** – М.: «ИАЦ Энергия», 2010.

**Стадник В. В., Клюева М. В., Задворных В. А., Самойлова Е. П., 2020:** Влияние наблюдаемых изменений климата на транспортную отрасль экономики (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды ГГО. – Вып. 599. – С. 7-25.

**Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, 2021.** Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 г. № 312-р.

**Стратегия социально-экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа на период до 2035 года** / Постановление ЗС ЯНАО, дата регистрации 24.06.21. – 219 с.

**Сушко С. В., Ананьева Н. Д., Иващенко К. В., Кудеяров В. Н., 2019:** Эмиссия $CO_2$, микробная биомасса и микробное дыхание почвы разного землепользования лесостепной зоны европейской России // Почвоведение. – № 9. – С. 1081-1091.

**Сырица М. В., 2020:** Анализ многолетних климатических и фенологических данных заповедника «Кедровая Падь» / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М.: Товарищество научных изданий КМК. – С. 69-75.

**Тарасова В. Н., Горшков В. В., 2019:** Влияние изменения климата на эпифитный лишайниковый покров в среднетаежных сосновых лесах дренированных местообитаний в Республике Карелия / В сб.: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – С. 191-192.

**Телеснина В. М., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Овсепян Л. А., Личко В. И., Ермолаев А. М., Мирин Д. М., 2017:** Динамика свойств почвы и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. – № 12. – С. 1514-1534.

**Терентьев П. М., Кашулин Н. А., Зубова Е. М., 2017:** Роль европейской корюшки Osmerus eperlanus (Linnaeus) в структуре ихтиофауны бассейна оз. Имандра (Мурманская область) //. Труды Зоологического института РАН. – Т. 321, № 2. – С. 228-243.

**Титкова Т. Б., Виноградова В. В., 2019:** Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т. 16, № 5. – С. 310-323.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Лаппо Е. Г., Морозова О. В., Покровская И. В., Тертицкий Г. М., Титова С. В., Царевская Н. Г., 2020:** Региональные биогеографические эффекты «быстрых» изменений климата в российской

Арктике в XXI в. // Арктика: экология и экономика. – № 2 (38). – С. 31-44.

**Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тертицкий Г. М., 2018:** «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. – № 2 (30). – С. 31-44.

**Торжков И. О., Кушнир Е. А., Константинов А. В., Королева Т. С., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019:** Прогнозируемые изменения климата и их влияние на лесной сектор экономики России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 40-49.

**Торопов П. А., Алешина М. А., Носенко Г. А., Хромова Т. Е., Никитин С. А., 2020:** Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 118-130.

**Тулина А. С., Семенов В. М., 2015:** Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению температуры и влажности // Почвоведение, № 8. – С. 952-962.

**Тюсов Г. А., Акентьева Е. М., Павлова Т. В., Школьник И. М., 2017:** Оценки возможного влияния будущих изменений климата России на функционирование объектов энергетики // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 47-57.

**Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В., 2006:** Пулы и потоки углерода лесов Дальневосточного федерального округа // Хвойные бореальной зоны. – № 3. – 11 с.

**Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Харламов М. А., Самсонов Т. Е., Энтин А. Л., Лурье И. К., 2020:** Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. – № 7. – С. 14-26.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2012:** Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в первой половине века // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 84-126.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019а:** Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI в.: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология. – № 3. – С. 11-23.

**Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М., 2019б:** Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 5-16.

**Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2021:** Вероятностные оценки изменения прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 7, № 2. – С. 140-158.

**Холодов А. Л., Ривкина Е. М., Гиличинский Д. А., Федоров-Давыдов Д.Г., Губин С. В., Сороковиков В. А., Остроумов В. Е., Максимович С. В., 2003:** Оценка количества органического вещества, поступающего в Арктический бассейн при термоабразии побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Криосфера Земли. – Т. VII, № 3. – С. 3-12.

**Хохлов Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В., 2018:** Многолетняя динамика границ ареалов птиц на северо-западе Европейской Части России / В сб. Первый Всероссийский орнитологический конгресс (г. Тверь, Россия, 29 января – 4 февраля 2018 г.). Тезисы докладов. – С. 336-337.

**Хусайнов Х. А., Абасов Ш. М., Хамурзаев С. М., Тунтаев А. В., 2015:** Агроэкологическая оценка почвенно-климатических условий Притеречных районов степной зоны Чеченской Республики // Плодородие. – № 4. – 3 с.

**Чадаева В. А., Пшегусов Р. Х., 2020:** Современное и прогнозируемое распространение Sorghum halepense (L.) Pers. на Кавказе // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. – Т. 20, № 1. – С. 46-52.

**Чебакова Н. М., Шульце Е. Д., Выгодская Н. Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Курбатова Ю. А., Парфенова Е. И., Валентини Р., Верховец С. В., Ваганов Е. А., 2014:** Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири // Известия РАН. Серия биологическая. – № 1. – С. 65-75.

**Черенкова Е. А., 2017:** Опасная атмосферная засуха на европейской части России в условиях современного летнего потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. – Т. 2. – С. 132-143.

**Честных О. В., Грабовский В. И., Замолодчиков Д. Г., 2020:** Запасы углерода в почвах лесных районов Дальнего Востока России / В кн.: IV Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами» – ФГБУН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов» РАН. – С. 131-133.

**Чимитдорджиева Г. Д., Чимитдоржиева Э. О., Мильхеев Е. Ю., Цыбенов Ю. Б., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Егорова Р. А., Солдатова З. А., Андреева Д. Б., Корсунова Ц. Д.-Ц., Давыдова Т. В., 2019:** Почвы криогенных форм рельефа на юге Витимского плоскогорья: распространение и роль в распределении пулов почвенного углерода // Почвоведение. – № 9. – С. 1029-1038.

Ч**упрова В. В., 2017:** Запасы, состав и трансформация органического вещества в пахотных почвах Средней Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – Вып. 90. – С. 96-115.

**Шевченко Н. Е., Кузнецова А. И., Тебенькова Д. Н., Смирнов В. Э., Гераськина А. П., Горнов А. В., Грабенко Е. А., Тихонова Е. В., Лукина Н. В., 2019:** Сукцессионная динамика растительности и запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. – № 3. – С. 163-176.

**Шеклеин С. Е., Велькин В. И., 2012:** Атомная энергетика и возобновляемые источники энергии – фундамент энергетической безопасности будущего // Альтернативная энергетика и экология. – № 3. – С. 119-121.

**Шепелев А. Г., Старостин Е. В., Федоров А. Н., Максимов Т. Х., 2016:** Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии // Наука и образование. – № 2. – С. 35-42.

**Шестой Национальный доклад «Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации», 2020.** https://chm.cbd.int/database/record?documentID=253450

**Ширяев А. Г., Мухин В. А., 2020:** Динамика численности субарктической микобиоты полуострова Ямал в связи с изменением климата // Растительный мир азиатской России: Вестник Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН. – № 4. – С. 79-88.

**Шихова Л. Н., Лисицын Е. М., 2014:** Динамика содержания и запасов углерода гумуса в пахотных подзолистых почвах подзоны Южной тайги Кировской области // Вестник Удмуртского университета. – Вып. 2. – С. 7-13.

**Шиятов С. Г., Мазепа В. С., 2015:** Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // Экология. – № 6. – С. 403-410, doi: 10.7868/S0367059715060165

**Школьник И. М., Е. М. Акентьева, М. В. Клюева, В. В. Стадник, Е. И. Хлебникова, Д. В. Фасолько, Е. Н. Разова, Ю. Л. Рудакова, В. Н. Павлова, 2022:** Федеральные округа России: изменения климата и экономика // Труды ГГО. – Вып. 604. – С. 55-77.

**Шляхтин Г. В., Аникин В. В., Беляченко А. В., Мосолова Е. Ю., Табачишин В. Г., 2014:** Современное состояние биоразнообразия животного мира Саратовской области // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – Т. 14, № 1. – С. 103-112.

**Щепащенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф., 2013:** Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. – № 2. – С. 123-132.

**Щуров В. И., Кучмистая Е. В., Вибе Е. Н., Бондаренко А. С., Скворцов М. М., 2015:** Самшитовая огневка Cydalima perspectalis (Walker, 1859) – настоящая угроза биологическому разнообразию лесов Северо-Западного Кавказа // Труды КубГАУ. – № 53. – С. 178-190.

**Яковлев А. А., 2017:** Птицы // Динамика природных явлений и процессов в экосистемах Зейского заповедника (Летопись Природы). – Т. 43. – С. 114-120

**Яковлева М. В., 2020:** Многолетние изменения сроков размножения рябинника и белобровика в заповеднике "Кивач" (Южная Карелия) на фоне потепления климата / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М., Товарищество научных изданий КМК. – С. 76-81.

**Янцер О. В., Серегин М. Р., Лаптев Н. А., 2020:** Влияние погодных аномалий 2020 года на весеннее развитие растений в ландшафтах Среднего Урала / В сб.: Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике – М., Товарищество научных изданий КМК. – С. 52-57.

**Ясюкевич В. В., Ривкин Л. Е., Ясюкевич Н. В., 2013:** Влияние погодных аномалий и процессов урбанизации на состояние популяции биоразнообразие шмелей в Московском регионе: преодоление биологических последствий аномального лета 2010 г. // Прикладная энтомология. – Т. 4, № 2. – С. 30-41.

**Ananicheva M., Karpachevsky A., 2015:** Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st

century // Environmental Earth Sciences, vol. 74, no. 3, pp. 1985-1995

**Ananicheva M., Kononov Yu., Belozerov E., 2020:** Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands, Bulletin of geography (Physical Geography Series) Nicolaus Copernicus University (NCU), Torun, v. 19, pp. 5-18, doi:10.2478/bgeo-2020-0006

**Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y., 2017:** Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment // Geographical Review, v. 107, № 1, pp. 108-124, doi:10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x

**Barrett K., Baxter R., Kukavskaya E., Balzter H., Shvetsov E., Buryak L., 2020:** Postfire recruitment failure in Scots pine forests of southern Siberia // Remote Sensing of Environment, v. 237, 16 p.

**Bezmaternykh D. M., 2016:** Spatial and temporal organization of benthic macroinvertebrate communities in Lake Chany, Western Siberia // Russian Journal of Ecology, v. 47, No. 5, pp. 480-485.

**Borken W., Savage K., Davidson E., Trumbore S., 2006:** Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil // Global Change Biology, v. 12, pp. 177-193.

**Brazhnik K., Hanley C., Shugart H. H., 2017:** Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia // Forests, v. 8, № 2, 49 pp., doi:10.3390/f8020049

**Brazhnik K., Shugart H. H., 2015:** 3D simulation of boreal forests: structure and dynamics in complex terrain and in a changing climate // Environmental Research Letters, v. 10, № 10, 105006, doi:10.1088/1748-9326/10/10/105006

**Fedorov, N.I., Martynenko, V.B., Zhigunova, S.N., Mikhailenko O. I., Shendel' G.V., Naumova L. G., 2021:** Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s // Russian Journal of Ecology, v. 52, pp. 118-125, doi: 10.1134/S1067413621020053

**Fomin V. V., Mikhailovich A. P., Shiyatov S. G., 2020:** Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals: Centuries-Old Change and Spatial Patterns // Mountain Research and Development, 40(2), doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00002.1

**Gaisin I. K., Moiseev P. A., Makhmutova I. I., Nizametdinov N. F., Moiseeva O. O., 2020:** Expansion of Tree Vegetation in the Forest-Mountain Steppe Ecotone on the Southern Urals in Relation to Changes in Climate and Habitat Moisture // Russian Journal of Ecology, v. 51, № 4, pp. 306-318, doi: 10.1134/S1067413620040074

**Gatti R. C., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A., Fabbio L., Battipaglia G., Liang J., 2019:** Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last-century climate change // Scientific Reports, v. 9, No. 1, 13 p., doi:10.1038/s41598-019-44188-1

**Glushenkov O. V., 2017:** The extending of ranges of some bird species at the North-Eastern border of their distribution due to intra-century climate changes // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – Т. 2, no.3. – С. 23-39.

**Grigor'ev A.A., Devi N. M., Kukarskikh V. V., V'yukhina S.O., Galimova A. A., Moiseev P. A., Fomin V. V., 2019:** Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau // Russian Journal of Ecology, v. 50, no.4, pp. 311-322, doi:10.1134/S1067413619040076. http://utp.nbcrs.org/

**Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Ranson K. J., Petrov I. A., 2017:** Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // Journal of Mountain Science, v. 14, no.3, pp. 442-452, doi:10.1007/s11629-016-4286-7

**Kondakova O. V., Savkin V. M., Dvurechenskaya S. Ya., Marusin K. V., 2020:** Water balance and patterns of mineralization of closed Lake Chany // Geography and Natural Resources, v. 41, no.1, pp. 51-58.

**Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y., 2014:** Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Global Change Biology, v. 20, no., pp. 938-947.

**Kurganova I., Merino A., Lopes de Gerenyu V., Barros N., Kalinina O., Giani L., Kuzyakov Y., 2019:** Climate dependent mechanisms of carbon sequestration and stabilization by restoration of arable soils after abandonment // Geoderma, v. 354, 113882. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113882

**Magritsky D., Frolova N., Evstigneev V., Povalishnikova E., Kireeva M., Pakhomova O., 2017:** Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // Polarforschung, v. 87, no.2, pp. 177-194.

**Mamai A. V., Moshkina E. V., Kurganova I. N., Shorohova E. V., Romashkin I. V., Lopes de Gerenyu V. O., 2018:** Partitioning of $CO_2$ Fluxes from Coarse Woody Debris: Adaptation of the Component Integration Method // Baltic forestry, 2018, v. 24, no.2, pp. 249-260.

**Mathisen I. E., Mikheeva A., Tutubalina O. V., Aune S., Hofgaard A., 2014:** Fifty years of tree line change in the Khibiny Mountains, Russia: Advantages of combined remote sensing and dendroecological approaches // Applied Vegetation Science, v. 17, no.1, pp. 6-16, doi:10.1111/avsc.12038

**Matskovsky V., Dolgova E., Morozova P., Semenyak N., Solomina O., 2020:** Radial growth projections for spruce on Solovetskiye Islands, the White Sea, for the 21st century, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing, v. 438, no. 1, 012017

**Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L., 2021:** Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // Science of the Total Environment, v. 785, 13 p.

**Osipov A. F., Bobkova K. S., Dymov A. A., 2021:** Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional, v. 27, pp. 1-9.

**Ovsepyan L, Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Kuzyakov Y., 2019:** Recovery of organic matter and microbial biomass after abandonment of degraded agricultural soils: the influence of climate // Land Degradation and Development, v. 30, no.15, pp. 1861-1874.

**Pospelova E. B., Pospelov I. N., Orlov M. V., 2017:** Climate change in Eastern Taimyr over the last 80 years and the warming impact on biodiversity and ecosystem processes in its territory // Nature Conservation Research, v. 2, № 3, pp. 48-60.

**Rets E., Durmanov I., Kireeva M., Smirnov A., Popovnin V., 2020:** Past 'peak water' in the North Caucasus: deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // Climatic Change, v. 163, pp. 2135-2151.

**Rumiantsev V. Y., Malkhazova S. M., Leonova N. B., Soldatov M. S., 2013:** Forecasting possible changes in zonal vegetation boundaries in European Russia and Western Siberia in connection with global warming // Contemporary Problems of Ecology, v. 6, no. 4, pp. 343-349, doi:10.1134/S1995425513040094

**Sannikov S. N., Tantsyrev N. V., Petrova I. V., 2018:** Invasion of Siberian Pine populations in mountain tundra in the Northern Urals. Contemporary Problems of Ecology, v. 11, no. 4, pp. 396-405, doi: 10.1134/s1995425518040078

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, v. 50, no. 1-2, pp. 215-230. DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6

**Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A., 2018:** Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data // Land, v. 7, no. 71, pp. 1-22, doi:10.3390/ land7020071

**Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T., Kuznetsov O., Smagin V., Fedotov Y. U., 2017:** Russian Federation (European Part). In: Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation, Joosten H., Tanneberger F., Moen A. (eds.), Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, pp. 589-616, doi:10.1127/ mireseurope/2017/0001-0049

**SREX, 2012:** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

**Vargot E., Shcherbakov A., Bolotova Ya., Uotila P., 2016:** Current distribution and conservation of Najas tenuissima (Hydrocharitaceae) // Nature Conservation Research, v. 1, no. 3, pp. 2-10.

**Visconti P., Elias V., Sousa Pinto I., Fischer M., Ali-Zade V., Báldi A., Brucet S., Bukvareva E., Byrne K., Caplat P., Feest A., Guerra C., Gozlan R., Jelić D., Kikvidze Z., Lavrillier A., Le Roux X., Lipka O., Petrík P., Schatz B., Smelansky I., Viard F., 2018:** Status, trends and future dynamics of biodiversity and ecosystems underpinning nature's contributions to people. Chapter 3 in: The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia, Rounsevell M., Fischer M., Torre-Marin Rando A., Mader A. (eds.), Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, pp. 187-382.

**Zhang Y., Enomoto H., Ohata T., Kitabata H., Kadota T., Hirabayashi Y., 2016:** Projections of glacier change in the Altai Mountains under twenty-first century climate scenarios // Climate Dynamics, v. 47, pp. 2935-2953.

**Zolotareva N. V., Zolotarev M. P., 2017:** The phenomenon of forest invasion to steppe areas in the Middle Urals and its probable causes // Russian Journal of Ecology, v. 48, no.1, pp. 21-31, doi: 10.1134/s106741361606014x.

## 3.2 Крупные города России

***П. И. Константинов, М. И. Варенцов, А. А. Бакланов***

Глобальное и региональное изменение климата неодинаковым образом проявляется в разнообразных природных и освоенных человеком ландшафтах Российской Федерации (Климат, 2017), что определяет их различную уязвимость к климатическому воздействию. Урбанизированные ландшафты (в особенности мегаполисы и крупные города) и климатическая система оказывают друг на друга взаимное влияние. В городах создается около 80% мирового ВВП, потребляется 2/3 энергии и производится 70% выбросов парниковых газов (здесь и сжигание ископаемого топлива, и транспорт, и отопление (Фалолеева, 2020)). Однако именно на урбанизированных территориях наиболее ощутим ущерб от гидрометеорологических бедствий.

В городах России изменение температурного режима происходит заметнее, чем на сопредельных территориях. Явление «городской остров тепла» (Urban Heat Island), известное еще с XIX века (Howard, 1818), представляет собой наиболее яркий пример влияния урбанизации на климат. Для острова тепла характерна положительная разность температуры городского пространства относительно окружающих его сельских областей, возникающая за счет теплофизических и геометрических особенностей застройки, пониженной эвапотранспирации, антропогенной активности и других факторов (Oke et al., 2017).

Так, по данным метеорологических наблюдений, в центре Москвы за 1988-2016 гг. рост среднегодовой температуры составил 0,55 °C/10 лет, что заметно превышает значение 0,36 °C/10 лет, характерное для сельской местности (Климат, 2017). В Санкт-Петербурге (крупнейшем мегаполисе Северной Европы) с 1979 года среднегодовая температура выросла на 1,7 °C (Гурьянов); в крупнейших городах Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) – Мурманске и Архангельске за последние полвека теплеет в среднем на 0,45 °C/10 лет (Semenova et al., 2019), что делает города «горячими точками» глобального потепления и определяет важность исследования климата городов.

### 3.2.1 Влияние изменения климата на инфраструктуру и качество воздуха

Двадцать первый век называют веком урбанизации. Города играют фундаментальную роль в климате как в локальном и региональном масштабах, изменяя потоки тепла и влаги, а также влияя на химический состав атмосферы, так и на глобальном уровне, будучи (пусть даже косвенно) ответственными за выбросы парниковых газов и повышение атмосферного загрязнения. И, наоборот, глобальное и региональное изменение климата влияет на инфраструктуру городов и комфорт их жителей, причем в ближайшие десятилетия ожидается усиление этого влияния (UN HABITAT-III, 2016). Одновременно с этим растет доля населения, проживающего в городских районах, по прогнозам к 2050 году она достигнет примерно 70% мирового населения (и более 74% в России) (UN DESA, 2018). Города с высокой плотностью населения и сложной инфраструктурой становятся одной из самых уязвимых сред при изменении климата. Это особенно важно в связи с увеличивающейся частотой и масштабами экстремальных природных явлений, например, волн тепла с чрезвычайно высокими температурами, усугубляемыми эффектом городского

острова тепла и приводящими к значительным последствиям для здоровья людей (см. подробнее в главе 3.2.2).

В последние десятилетия воздействие изменения климата в российских городах проявилось в увеличении повторяемости экстремальных природных явлений, таянии многолетней мерзлоты, повышении уровня моря, загрязнении окружающей среды, увеличении рисков продовольственной безопасности, ухудшении условий жизнедеятельности. Тенденции к урбанизации проявляются также в сельской местности, население которой в меньшей степени приспособлено к негативным изменениям климата.

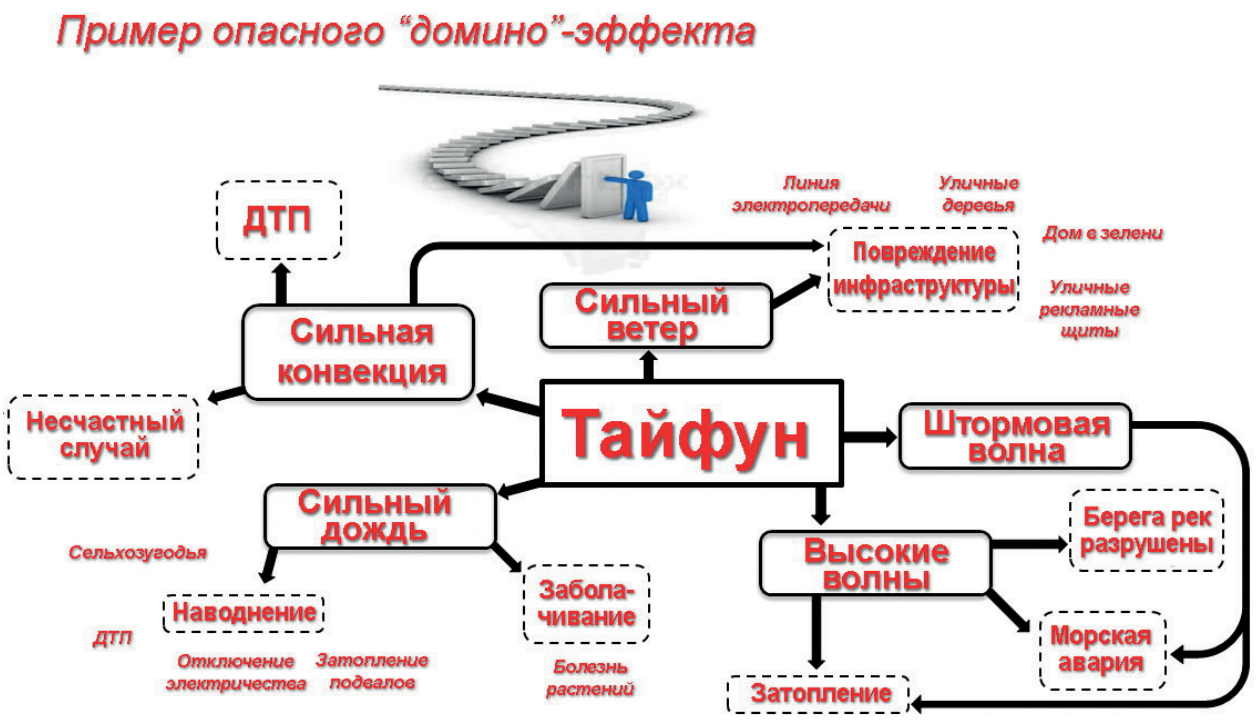



***Рис. 3.2.1*** *Схема «домино»-эффекта на примере тайфунов*

На урбанизированных территориях единичное экстремальное природное явление может привести к каскадному эффекту, который породит новые бедствия, опасности и последствия, порой приводящие к широкомасштабному разрушению инфраструктуры города, часто из-за каскадирования вниз по последствиям или эффекта «домино» (Baklanov et al., 2018). Схема такого «домино»-эффекта на примере ураганов приведена на рис. 3.2.1. Оценки как прямых, так и косвенных воздействий изменения климата на городские районы и инфраструктуру являются важными для оценки их последствий и оптимального городского планирования (рис. 3.2.1 и 3.2.7). Косвенные воздействия отражаются на антропогенной среде и, как следствие, на экономике городов.

**Основные последствия потепления климата для инфраструктуры городов России**

Для российских городов можно выделить следующие основные угрозы, связанные с потеплением климата (Оганесян, 2019):

- рост повторяемости, интенсивности и продолжительности засух в одних регионах,

экстремальных осадков, наводнений – в других;
- деградация многолетней мерзлоты с ущербом для строений и коммуникаций (Streletskiy et al., 2019);
- увеличение расходов электроэнергии на кондиционирование воздуха в летний сезон для значительной территории страны (Клименко и др., 2016);
- уменьшение долговечности зданий, в особенности, блочных и панельных;
- ухудшение качества теплоснабжения вследствие кратковременных изменений температуры воздуха и учащения оттепелей зимой (Оценка, 2011);
- рост рисков аварий на ЛЭП (разрыв проводов и разрушение опор) и аварий на дорогах из-за опасного гололедообразования и гололедицы (Оценка, 2011);
- возрастание частоты и высоты заторных наводнений в северных регионах страны и уменьшение частоты весенних наводнений, вызванных снеготаянием, на юго-западе;
- увеличение частоты и высоты нагонных наводнений в устьях рек, прежде всего в устье Невы.

Некоторые положительные последствия изменения климата в основном коснутся лишь городов АЗРФ. Увеличение температуры воздуха для арктических городов является позитивным фактором с точки зрения увеличения термического комфорта для жителей и энергосбережения для отопления зданий, транспортной инфраструктуры и технологических процессов (см. также гл. 3.2.3). Происходящее в Арктике потепление усилит интерес к северной урбанизации, вследствие увеличения продолжительности навигации по Северному морскому пути и облегчения освоения нефтегазовых месторождений на шельфе. Однако и негативные эффекты этого явления могут быть достаточно ощутимыми (Росгидромет, 2017).

**Экстремальные погодные явления**

**Лесные пожары**

Происходящие на территории Российской Федерации повышение температуры, неравномерное увеличение количества осадков и модификации ряда других параметров все более усиливают риск возникновения лесных пожаров (Bondur et al., 2020; Mokhov et al., 2020). Продолжительность сезона лесных и торфяных пожаров увеличивается (Ревич, 2011; Shaposhnikov et al., 2014; Nefedova, 2021). Большие площади выгоревших территорий обнажают сибирскую многолетнюю мерзлоту, льды тают быстрее, а вслед за пожаром идут наводнения (Росгидромет, 2014).

На обширных территориях Сибири и Дальнего Востока отмечается тренд к ежегодному увеличению площади пожаров на $0{,}79 \cdot 10^6$ га (Замолодчиков, Краев, 2016). В 2020 году в Сибири из-за сильной жары выгоревшая площадь превысила обычную, при этом в атмосферу было выброшено углекислого газа больше, чем в предыдущие годы (Voronova et al., 2020). Последствия лесных пожаров особенно остро ощущаются в сибирских городах. Яркой демонстрацией этого являются экстремальные пожары и смог, накрывший Якутск и другие сибирские города летом 2021 года.

По данным Росгидромета, за последние 25 лет число подобных стихийных бедствий в России увеличилось в два раза (Росгидромет, 2014).

**Наводнения и повышение уровня моря**

Растущее число наводнений и связанное с глобальным потеплением повышение уровня Ми-

рового океана создают дополнительные риски для городов, расположенных на побережье и в низинных территориях.

Санкт-Петербург, как мегаполис, расположенный в подверженном наводнениям районе, особенно чувствителен к неблагоприятным последствиям изменения климата (Малинин и др., 2016). Планирование застройки города со времени его основания ориентировалось на обеспечение адаптации к географической широте, сложным геологическим и гидрогеологическим условиям, избыточному увлажнению и специфике природных особенностей территорий, расположенных в устье Невы.

С точки зрения затопления побережья Финского залива, наибольшее значение имеют: вековой рост уровня моря, штормовые нагоны, связанные с прохождением циклонов, вызывающих наводнения в осенне-зимний период. Негативное воздействие также оказывают наводнения, вызываемые зажорами и заторами на реке Нева.

**Качество городского воздуха**

Характерный для городов повышенный уровень загрязнения атмосферы в комбинации с усилением влияния волн тепла (см. главу 3.2.2), приводит к снижению комфортности условий проживания.

Изменение климата может повлиять на качество воздуха и, наоборот, изменение состава атмосферы влияет на изменение климата (IPCC, 2021). Как уже отмечалось выше, города ответственны за выбросы более 70% $CO_2$ – главного антропогенного парникового газа. Как парниковый газ проявляет себя и озон ($O_3$). Различные компоненты твердых частиц могут оказывать на климат как согревающее, так и охлаждающее воздействие. Например, черный углерод (аэрозольные твердые частицы, возникающие в результате горения) способствует нагреванию атмосферы Земли, в то время как сульфаты в виде твердых частиц – ее охлаждению.

Изменение климата также может повлиять на экологию городов и здоровье человека, делая воздух более вредным для дыхания. Повышение температуры воздуха может привести к увеличению количества аллергенов (например, пыльцы) и вредных примесей в атмосфере городов, например, содержания приземного озона (Baklanov et al., 2016).

Исследования, выполненные с использованием совместных моделей климата и химии атмосферы показывают, что в ближайшие десятилетия содержание озона у поверхности в летнее время в загрязненных регионах увеличится на 1-10 млрд$^{-1}$ (Jacob, Winner, 2009). Для северо-востока США летом максимальное суточное содержание приземного $O_3$ возрастет к 2050 году по сценарию SRES A1B на 2-5 млрд$^{-1}$ по сравнению с уровнем 2000 года (Doherty et al., 2013). Это потребует введения более строгого контроля выбросов для обеспечения требуемого стандарта качества воздуха в городах. Новые стандарты качества атмосферного воздуха, рекомендованные ВОЗ (WHO, 2021), существенно ужесточают требования к чистоте атмосферного воздуха.

Воздействие изменения климата на концентрацию твердых частиц, регулируемую осадками и турбулентным перемешиванием, более сложное и неопределенное, чем на озон. Исследования с использованием совместных моделей климата и химии атмосферы (Jacob, Winner, 2008) показывают, что в глобальном масштабе

совокупная концентрация аэрозолей в ближайшие десятилетия изменится на ±0,1…1 мг/м$^3$.

Для российских городов важен и тот факт, что повышение повторяемости лесных пожаров и пыльных бурь, вызванное изменением климата, может стать все более важным источником твердых частиц, в том числе и для атмосферы городов (см., например, Konovalov et al., 2011).

Повышение температуры изменяет не только массу аэрозоля, но и его химический состав (Myhre et al., 2013). Наиболее значимый эффект повышения температуры проявляется через биогенные выбросы, за которыми следуют эффект уменьшения сухого осаждения, а также выбросы продуктов лесных пожаров. Влияние температуры на биогенные выбросы и сухие осадки потенциально могут привести к значительному увеличению содержания приземного озона в более теплом климате. Выбросы от мегаполисов дополняются выбросами с сельскохозяйственных территорий (например, нитратов). Ожидается, что с потеплением климата в центральной и северной Европе выбросы аммиака, в частности, увеличатся до 40% (Skjøth, Geels, 2013).

### 3.2.2 Городские острова тепла и энергопотребление крупных городов Российской Федерации

**Современное состояние проблемы**

Изменения климата в крупных городах складываются из совместного воздействия региональных климатических изменений и изменения микроклиматических свойств территории.

Исследования островов тепла городов Российской Федерации (как и для любой крупной территории) уместно подразделить на две категории:

***1. Исследование классического острова тепла (Canopy layer UHI)***

«Урбанистическое усиление» потепления климата для Московского мегаполиса подробно описано в (Климат, 2017; Кислов и др., 2017).

Интенсивность острова тепла Москвы оценивается в 2,2 °С, что превосходит аналогичные оценки для большинства крупнейших городов мира. Так, интенсивность острова тепла Лондона (население агломерации 14,5 млн человек) на начало 1990-х гг. составляла 1 °С (Lee, 1992) и с тех пор практически не изменилась (Wilby, 2003). Интенсивность острова тепла Пекина, превосходящего Москву по численности населения (21 млн человек в агломерации), по различным оценкам, на конец 1990-х – начало 2000-х гг. составляла 1,5-1,8 °С (Liu et al., 2007).
В Санкт-Петербурге тепловая аномалия на территории мегаполиса по данным за 1994-2018 гг., составляет в среднем за год 1,13 °С, причем наибольшая интенсивность острова тепла имеет место в феврале, когда ее максимальные значения достигают 6,4 °С, а средние – 3,0 °С (Ладохина и др., 2020). В Челябинске получены лишь «мгновенные» оценки максимальной интенсивности острова тепла в зимний период, согласно которым тепловая аномалия может достигать 15 °С (Кораблева, Ленская, 2010).

Вопросы определения конкретных климатических значений интенсивности острова тепла для других крупных российских городов-миллионников затрагиваются лишь в редких работах, причиной чему могут служить как слабо развитые сети городских метеорологических станций, так и малая популярность темы в последние десятилетия. Отрывочные сведе-

ния по данным маршрутных наблюдений имеются для Томска: средняя интенсивность острова тепла составляет около 1 °С летом и 2 °С зимой (Дудорова, Белан, 2016б).

Для Архангельска – областного центра, расположенного рядом с крупной речной дельтой, интенсивность явления по данным анализа данных метеорологических измерений в середине XX века оценивается в пределах 0,3-0,4 °С, что может (ввиду давности) служить лишь ориентировочным значением (Танский, Мазуров, 2010).

Во Владивостоке исследования демонстрируют лишь падение скорости ветра за счет городской застройки (Стрежалковская, Поталова, 2018).

***2. Работы, анализирующие интенсивность острова тепла (Surface Urban Heat Island – SUHI) по данным спутникового зондирования температуры поверхности.***

Исследования, выполненные для отдельных городов Центральной России показали, что интенсивность острова тепла в 2018 году составила для Рязани и Твери 2,0 °С и 0,2 °С, соответственно (Локощенко, Енукова, 2021); для Новосибирска в условиях жаркой погоды 2019 года – 17,8 °С (Газимов, Чурсин, 2021). Для Ставрополя положительная динамика острова тепла от 1990 к 2020 г. оценена лишь качественно (Булдакова, Костикова, 2021), для Красноярска выделены только внутригородские зоны термических аномалий до 5,8 °С. Для Иркутска и Братска установлено, что межгодовая изменчивость интенсивности островов тепла статистически не значима с 1998 по 2019 гг., но при этом площади «островов» заметно увеличились за период исследования (Сутырина, 2020). Для отдельных городов, например, для Воронежа работы лишь постулируют необходимость изучения островов тепла для хозяйственных целей (Попова и др., 2018).

**Микроклиматические тренды в городах Российской Федерации**

Долгопериодные тренды для городского острова тепла Москвы в последние годы хорошо изучены (Кислов и др., 2017; Varentsov et al., 2020б). Темпы роста острова тепла сравнимы с темпами глобального потепления в предыдущие 20 лет. Для станции МГУ («зеленая» станция) по сравнению с Подмосковьем темпы роста составили 0,13 °С за 10 лет, а по данным станции «Балчуг» (максимально урбанизированная станция) – 0,25 °С за 10 лет.

Исследование изменений среднегодовой интенсивности классического острова тепла для Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга и Курск было проведено за период 1966-2012 гг. (Константинов, Куканова, 2014).

Результаты, представленные на рис. 3.2.2, показывают, что в Москве за последние 37 лет интенсивность острова тепла увеличилась на 0,3 °С (относительно «зеленой» городской станции ВДНХ), в то время как в Санкт-Петербурге за тот же период лишь на 0,1 °С. Для Екатеринбурга за 46 лет остров тепла усилился на 0,3 °С, причем в последние 20 лет темпы роста резко замедлились. Для Курска аналогичный параметр составил 0,2 °С, но в последние 30 лет темпы роста, наоборот, увеличились. Логично предположить, что на изменение интенсивности острова тепла влияют как региональные климатические факторы, так и местные, например, рост и расширение городской застройки.

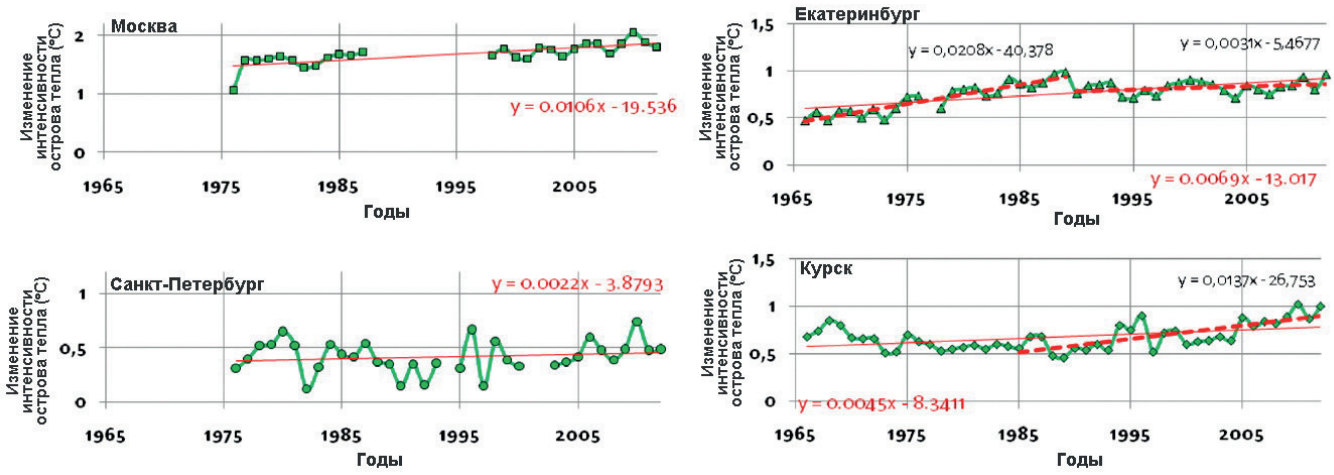



***Рис. 3.2.2*** *Изменение среднегодовой интенсивности городского острова тепла для Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга и Курска за период 1966-2012 гг. (Константинов, Куканова, 2014)*

**Влияние климата на энергетику в городах Российской Федерации**

Поскольку города являются основными потребителями энергии, то связь тепловых аномалий с балансом антропогенного потока тепла исследовалась многими авторами. Так, например, в работе (Гинзбург, Демченко, 2017) отмечается, что «обратные связи» (положительные и отрицательные) в системе «город – энергетика –климат», может быть, еще не являются определяющими, но уже очень серьезными факторами, действие которых зависит во многом от тех же процессов, которые определяют формирование городского острова тепла». Такие связи особенно сильны в антициклональных условиях зимнего периода при слабой адвекции температуры.

Для Томска с помощью несложной модели показано что основной вклад в образование острова тепла вносит антропогенный поток тепла – 80-90% зимой и 40-50% летом, и поглощение коротковолновой радиации городской подстилающей поверхностью – 5-15% зимой, 40-50% летом (Дудорова, Белан; 2016а, б). Антропогенный вклад при этом важен не только для термического режима (Дудорова, Белан; 2016а).

Оценки роли теплофизических свойств зданий и сооружений в слое атмосферы над городом (на примере ряда городских районов Санкт-Петербургской агломерации) были получены с использованием энергобалансовой модели расчета антропогенного потока тепла (Гинзбург и др., 2021). Такого рода модели вполне могут быть использованы для улучшения качества прогноза погоды в городах для параметризации потоков энергии с урбанизированной подстилающей поверхности в пограничный слой атмосферы в расчетах регионального уровня. Для Москвы важная роль антропогенного теплового фактора в формировании зимнего острова тепла подтверждается также данными расчетов по модели COSMO с параметризацией городского пограничного слоя (Гинзбург, Докукин; 2021; Varentsov et al., 2020в).

В столичном регионе с начала XXI века наблюдаются заметные отклонения зимних температур относительно нормы за 1961-1990 гг. и незначительное уменьшение продолжительности отопительного периода (Гинзбург и др.,

2016). Однако фактические продолжительность отопительного периода и расход энергии на обогрев помещений в Москве изменяются меньше, чем прогнозируемые, поскольку они определяются не только климатическими и погодными факторами, но и существующими технологиями подачи тепла и практикой эксплуатации зданий.

Подводя итог, следует отметить, что скорее всего в расположенных преимущественно в континентальных условиях средних широт городах Российской Федерации необходимо адаптировать теплоэнергетическое хозяйство этих городов к возможным относительно продолжительным теплым периодам в течение отопительного сезона и повышенной потребности в электроэнергии на вентиляцию и кондиционирование воздуха во время учащающихся летних волн тепла и опасных условий термического дискомфорта.

### 3.2.3 Влияние изменения климата на комфортность проживания населения

Наблюдаемое изменение климата, в совокупности с растущими запросами общества на комфортную и безопасную городскую среду, определяют все больший научно-практический интерес к понятию климатической (термической) комфортности. Термическая комфортность – это непосредственное ощущение, насколько жарко или холодно человеку в окружающей среде, она зависит не только от температуры воздуха, но и от других факторов, определяющих теплоощущение человека: влажности воздуха, скорости ветра, коротковолновой и длинноволновой радиации, а также от индивидуальных параметров человека – пола, веса, степени физической активности, одежды и возраста.

Для количественной оценки термической комфортности существует широкий набор специализированных биоклиматических индексов, обзор которых можно найти в работах (Potchter et al., 2018; Емелина и др., 2014). Так называемые «простые» индексы описывают теплоощущение человека на основе эмпирических зависимостей от нескольких метеопараметров. К их числу относятся, например, популярные в США и Канаде индексы Heat Index, Humindex, Wind Chill Temperature. Для получения более физиологически-релевантной и точной оценки теплоощущения разработаны индексы, опирающиеся на энергобалансовые модели человеческого организма. Наиболее популярными среди них являются индексы PET (Physiologically Equivalent Temperature) и UTCI (Universal Thermal Comfort Index) (Jendritzky et al., 2012). Именно эти два индекса наиболее широко используются во всем мире в задачах оценки термического комфорта в различных пространственных и временных масштабах.

В мировой практике применения индексов термического комфорта можно выделить два направления, наиболее соответствующих задаче оценки условий комфортности проживания населения.

Первое направление – это оценка условий термического комфорта в масштабе физико-географических макрорегионов, отдельных стран или планеты в целом планеты, с целью анализа крупномасштабной «климатологии» комфортности, диагноза и прогноза ее изменений (Giannaros et al., 2018; Jacobs et al., 2013; Napoli Di et al., 2020). Чаще всего в таких задачах используются данные реанализа или данные климатических прогнозов.

Второе направление – это оценка термического комфорта на внутригородском масштабе с уче-

том особенностей городской среды и ее влияния на микро- и мезоклимат. Актуальность этого направления обусловлена, с одной стороны, концентрацией населения именно в городах, с другой стороны – особенностями городского климата.

Остров тепла в совокупности с другими особенностями городского климата напрямую влияет на термическую комфортность и условия проживания населения, а также повышает вероятность теплового стресса у многих людей (Hove van et al., 2011; Konstantinov et al., 2014; Varentsov et al., 2020б). В условиях «волн тепла» это приводит к повышению смертности в городах по сравнению с пригородами (Buechley et al., 1972; Tan et al., 2010). Для оценки термического комфорта внутри города требуются данные метеорологических наблюдений на репрезентативных для городской среды станциях, или специальные методы микроклиматического моделирования.

Несмотря на высокий интерес к проблеме климатических изменений, в России работы по исследованию термического комфорта населения в городах носят фрагментарный характер и достаточно немногочислены. Тем не менее, они позволяют проиллюстрировать ключевые тенденции изменений термического комфорта и связанные с этим проблемы.

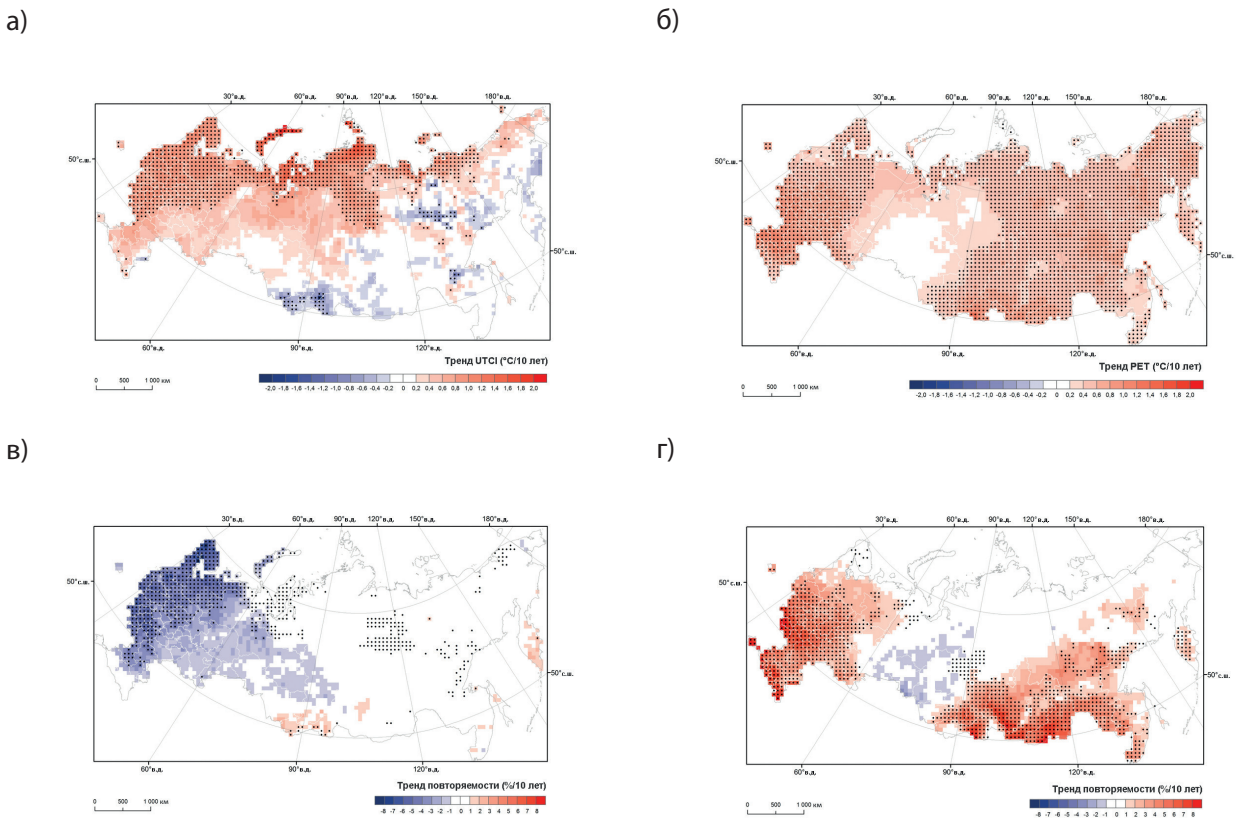
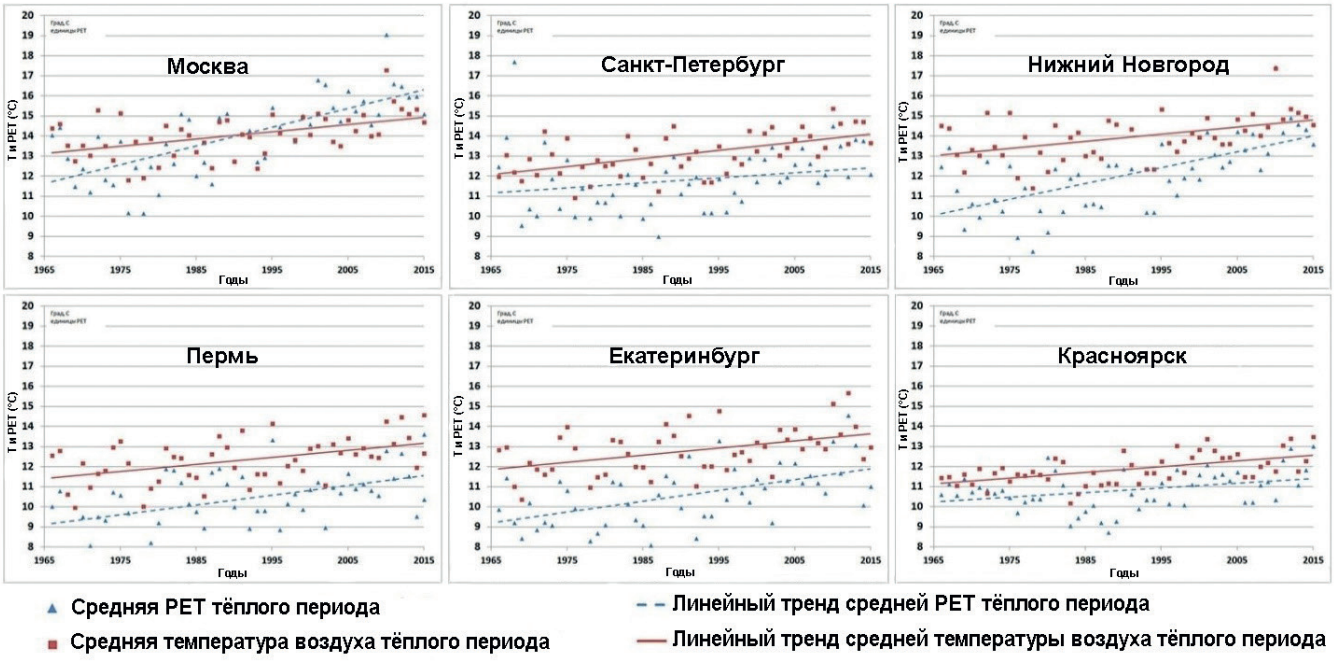



***Рис. 3.2.3*** *Скорость изменения средних зимних значений индекса UTCI (а), средних летних значений индекса PET (б), повторяемости дней с очень сильным холодовым стрессом зимой по индексу UTCI (в) и дней с тепловым стрессом по индексу PET (г) по данным реанализа ERA-Interim за 1979-2018 гг. Адаптировано из (Varentsov et al., 2020a)*

Исследования условий термического комфорта в масштабе всей России предпринимались и ранее (Vinogradova, Zolotokrylin, 2014), но лишь недавно такие оценки было получены

для физиологически-релевантных биометеорологических индексов: индекса UTCI по данным сети метеорологических станций (Vinogradova, 2019) и индексов PET и UTCI по данным реанализа ERA-Interim (Varentsov et al., 2020a). В последней работе проанализированы средние значения индекса, повторяемость различных градаций термического стресса и тренды его изменений. По результатам исследования сделан вывод о значимой тенденции роста средних значений индексов комфортности и изменения повторяемости дней с тепловым и холодовым стрессом, причем для скорости изменений характерна четко выраженная пространственная неоднородность. По данным за 1979-2018 гг., скорость роста средних зимних значений UTCI максимальна на ETP и в Арктике, скорость роста средних летних значений индекса PET – на ETP, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (рис. 3.2.3а, б). При этом повторяемость зимних дней с сильным холодовым стрессом быстрее всего сокращается на территории ETP, где растет повторяемость дней с летним тепловым стрессом (рис. 3.2.3в, г). Таким образом, население ETP ощущает наиболее существенные изменения условий термического комфорта.




Средние тренды температуры воздуха и PET в различных регионах Российской Федерации в 1966 - 2015 гг.

| Города | Москва | Санкт-Петербург | Нижний Новгород | Пермь | Екатеринбург | Красноярск |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Линейный тренд температуры воздуха | 0,36°C/10 лет | 0,40°C/10 лет | 0,38°C/10 лет | 0,34°C/10 лет | 0,36°C/10 лет | 0,29°C/10 лет |
| Линейный тренд PET | 0,93°C/10 лет | 0,25°C/10 лет | 0,83°C/10 лет | 0,47°C/10 лет | 0,54°C/10 лет | 0,24°C/10 лет |

***Рис. 3.2.4*** *Сравнение трендов температуры воздуха и физиологически-эквивалентной температуры (PET) для городов России, согласно (Konstantinov et al., 2021)*

Особый интерес представляют оценки термической комфортности непосредственно для мест проживания большей части населения России (т.е. жителей городов), полученные с учетом особенностей городского климата. К сожалению, для России такие работы крайне редки, что во многом связано с низким пространственным разрешением используемых моделей прогноза

погоды и климата, а также с дефицитом надежных и продолжительных метеорологических наблюдений на урбанизированных территориях. Оценки динамики показателей термического комфорта по данным наблюдений: получены для ряда городов АЗРФ, в том числе Архангельска (Konstantinov et al., 2020; Semenova et al., 201) и для отдельных крупных городов: Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Перми, Екатеринбурга, Красноярска (Konstantinov et al., 2021) (рис. 3.2.4).

Для всех перечисленных городов отмечается многолетняя тенденция роста средних значений показателей термической комфортности (средних значений индексов PET и/или UTCI), при этом в большинстве случаев скорость его изменения выше, чем скорость роста температуры воздуха. Такая тенденция отражает сопряженное воздействие на условия термический комфортности изменений режима других метеорологических величин, в первую очередь, скорости ветра и облачности. Важно отметить, что в указанных выше работах для оценки условий термического комфорта для каждого из городов использованы данные только одной метеостанции государственной наблюдательной сети с наиболее длинным рядом, которая в большинстве случаев не характеризует условия городской застройки (как правило, такие станции расположены за городской чертой или в зеленых зонах), что может искажать полученные оценки.

Например, при особо тщательном рассмотрении тенденций изменения комфортности в Москве – крупнейшем российском мегаполисе, не имеющим аналогов в стране по численности населения – видно (рис. 3.2.5), что в последние 50 лет индекс термического стресса растет быстрее, нежели теплеет окружающая среда (Климат, 2017).

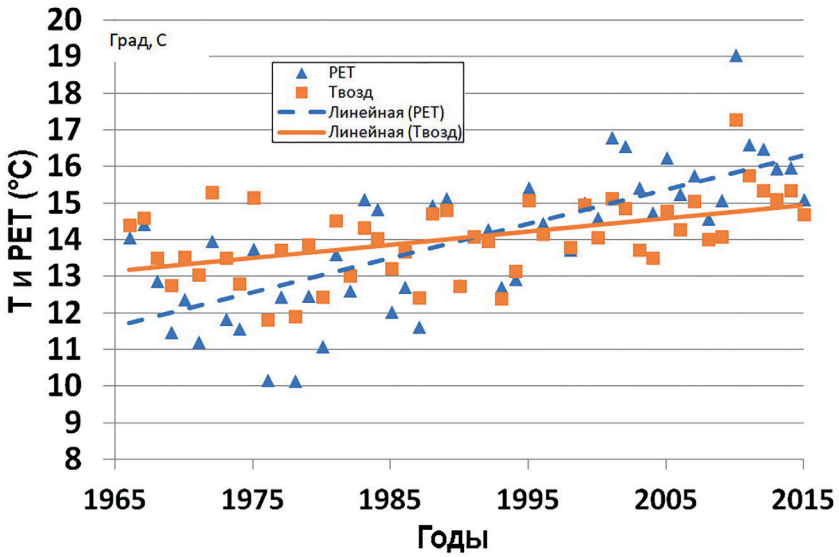



***Рис. 3.2.5*** *Изменение летнего индекса термического стресса PET и температуры воздуха в Москве за период 1966-2015 гг. (Климат, 2017)*

Московский регион лучше многих других территорий России обеспечен данными метеорологических наблюдений. Это позволяет оценить влияние урбанизации на условия термического комфорта. Метеорологические станции в Московском регионе расположены

в городских и пригородных условиях: метеостанция Балчуг характеризует климат центральной, плотно застроенной части Москвы, метеостанции МГУ и ВДНХ – условия городских парков.

Рис. 3.2.6 наглядно иллюстрирует, что летом на фоне общерегиональной тенденции потепления рост летних температур в городе на 42% превышает рост температуры за городом, т.е. имеет место урбанистическое усиление потепления (Кислов и др., 2017, 2020; Климат, 2017). Зимой такого эффекта не наблюдается.

Влияние города не может не сказываться на условиях термического комфорта в многолетней динамике (Varentsov et al., 2020б). Для городских метеостанций повторяемость летнего термического стресса выше, чем для фоновых территорий. Для центра города в среднем в последнее десятилетие она превышает загородную почти в два раза, составляя 13% и 7,3% соответственно. По данным за 1977-2018 гг. повторяемость летнего теплового стресса в центре города увеличивается на 2,36%/10 лет, а за городом – на 1,38%/10 лет. Зимой повторяемость холодового стресса в городе снижается более чем в два раза. Однако на фоне региональной тенденции уменьшения повторяемости холодового стресса, различия условий зимнего термического комфорта между городом и фоном ослабевают. Таким образом, смягчающее влияние города на зимний холодовой стресс снижается, а на летний – усиливается, то есть в целом влияние такого города, как Москва, на условия термического комфорта становится более негативным. Можно ожидать, что схожие эффекты имеют место и в других крупных городах России в зоне умеренного климата.

Опасность усиления термического стресса в городах демонстрируют и более детальные исследования отдельных показательных случаев. Например, оценка пространственной неоднородности термического стресса в Москве во время экстремальной волны тепла 2010 г. была выполнена на основе индекса PET по данным детализированного мезомасштабного моделирования в рамках региональной климатической модели COSMO, дополненной городской параметризацией TERRA_URB (Zemtsov et al., 2020). В результате было показано, что в пределах застроенных территорий повторяемость термического стресса значительно выше, чем за пределами города (на 20% в условиях умеренного и в 1,5 раза в условиях сильного стресса, см. рис. 3.2.7). Вероятно, это обстоятельство стало одним из факторов аномального повышения смертности, наблюдавшегося в Москве летом 2010 г. (Ревич, 2011).

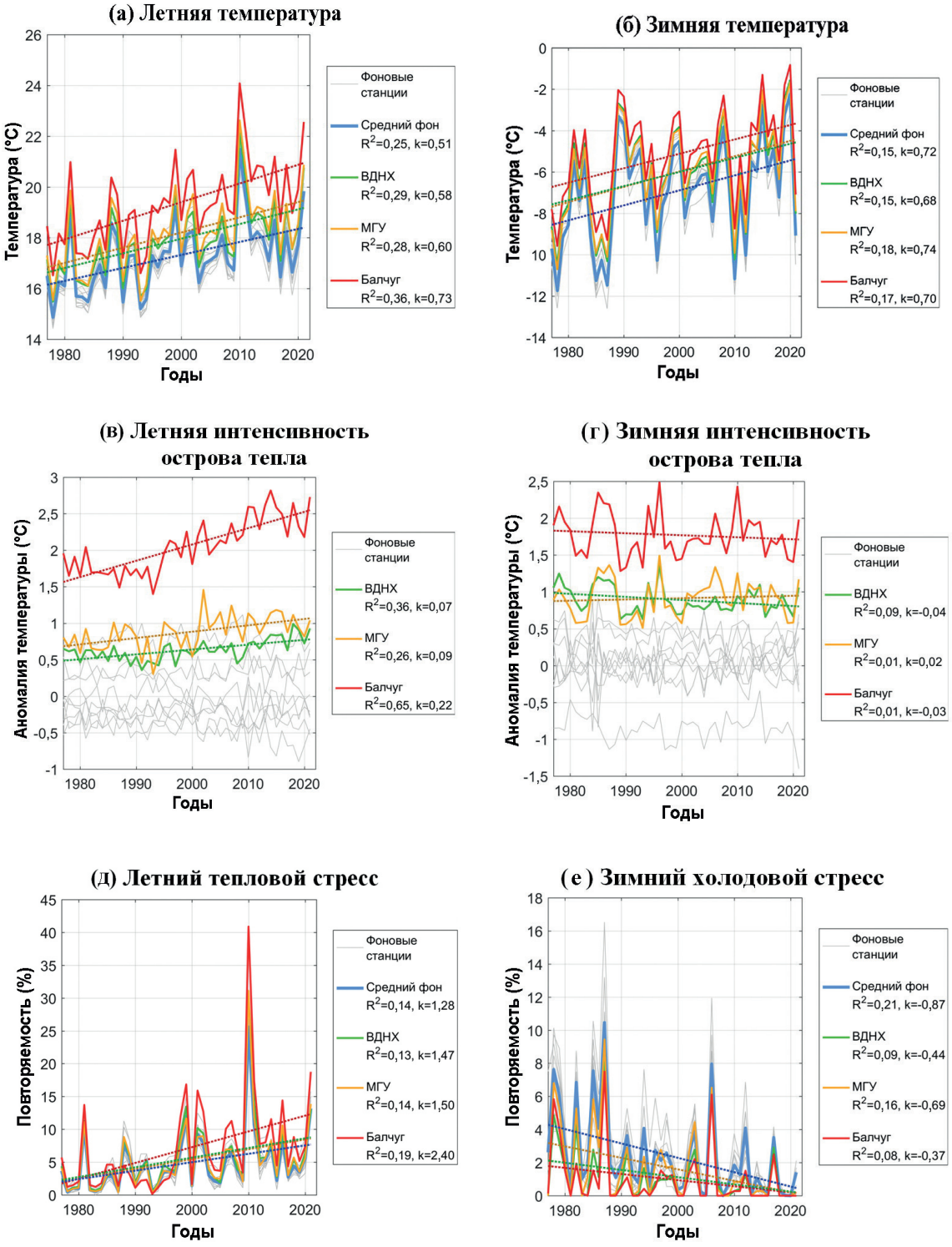



***Рис. 3.2.6*** *Изменение температуры воздуха, интенсивности острова тепла и повторяемости теплового/холодового стресса в Московском регионе за 1977-2021 гг.*

*Для характеристики стресса приведена повторяемость сроков наблюдений с тепловым стрессом летом в соответствии с индексом HI (д) и повторяемость сроков с высоким или более сильным холодовым стрессом зимой по индексу WCT (е).*

*Линейные тренды обозначены пунктирными линиями для каждой городской метеостанции и для фонового значения – среднего по девяти загородным станциям. Коэффициенты линейного тренда (k °C/10 лет или %/10 лет), коэффициент детерминации $R^2$ приведены в легенде для каждого графика. Адаптировано из (Varentsov et al., 2020б)*

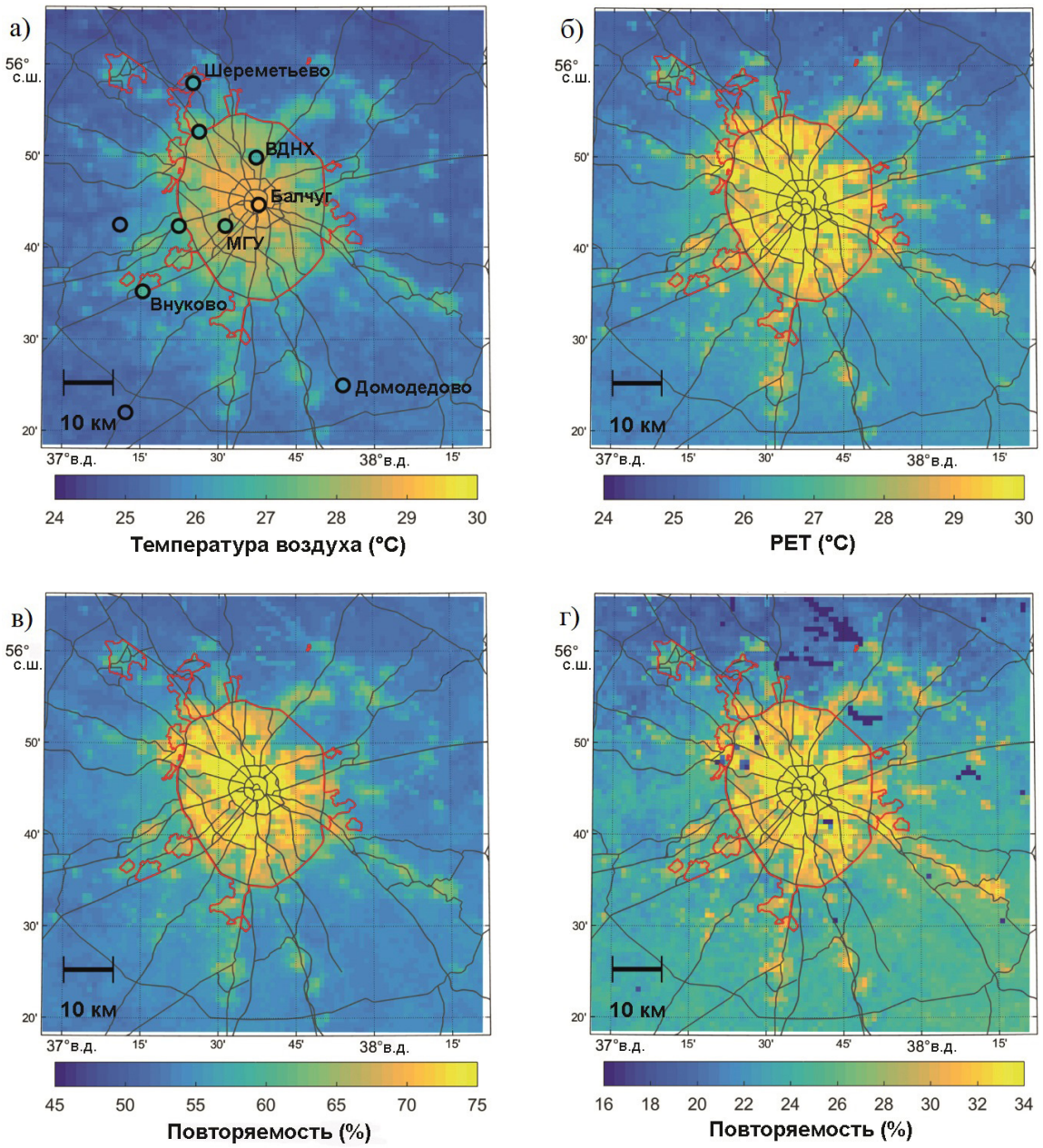



***Рис 3.2.7*** *Средняя температура воздуха (а), физиологически-эквивалентная температура (PET) (б) и повторяемость ежечасных значений легкого теплового стресса (в) и сильного теплового стресса (г) в Московском регионе во время волн тепла 2010 года по данным моделирования с помощью региональной климатической модели COSMO-CLM (Zemtsov et al., 2020)*

## 3.2.4 Изменение климата и города Арктической зоны Российской Федерации

Температура на территории России растет значительно быстрее общемировой и особенно быстро – в Арктике (см. главы 1.1.1 и 1.2.1). Все без исключения современные климатические модели прогнозируют потепление климата России в XXI веке, заметно превышающее среднее глобальное потепление (Росгидромет, 2017). Наибольшее повышение температуры ожидается зимой, причем оно усиливается к северу, достигая максимальных значений в Арктике, что в сочетании с микроклиматическими особенностями городских территорий может вызывать значительные аномалии температуры воздуха (Oke et al., 2017; Esau et al., 2021).

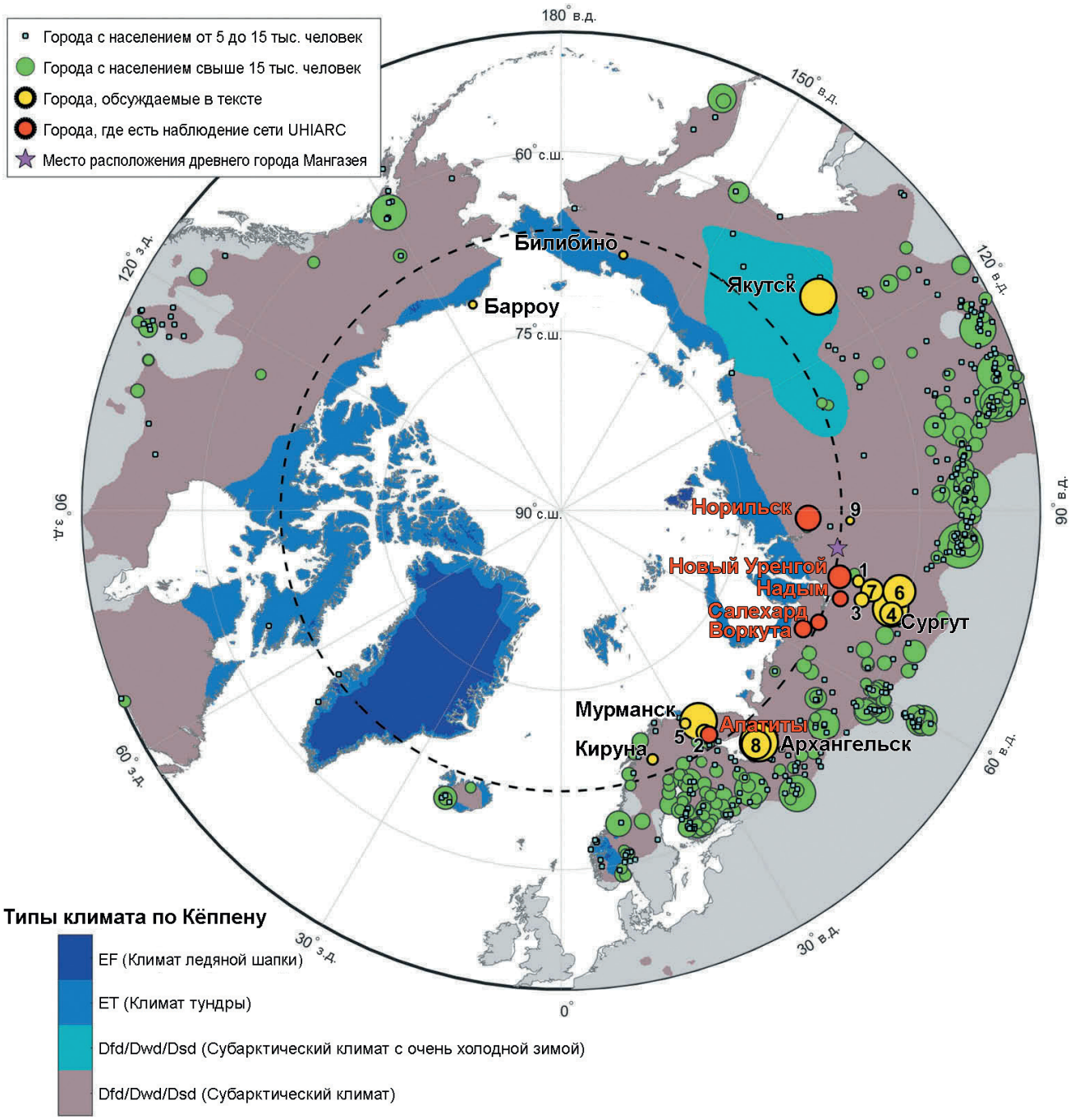



***Рис. 3.2.8*** *Города, расположенные в пределах холодных климатов (разновидности: Dfc, Dwc, Dsc, Dfd, Dwd, Dsd, ET and EF) согласно классификации Кеппена – Гейгера*

*Красным цветом отмечены города, в которых производятся микроклиматические наблюдения и измерения на сети UHIARC (из Laruelle et al., 2019), желтым – города, обсуждаемые непосредственно в (Laruelle et al., 2019)*

Характерный для Заполярья недостаток данных привел к тому, что к началу первого десятилетия XXI века современная климатология обладала крайне скудной информацией о микроклиматических особенностях городов, расположенных в высоких широтах. В XX веке проведенные на Аляске единичные исследования показали существование в зимнее время мощных островов тепла в относительно небольших городах Барроу (Hinkel et al., 2003) и Фэрбанкс (Magee et al., 1999). В Восточной Арктике за полярным кругом имеются

более урбанизированные территории с крупными городами Мурманск, Воркута, Апатиты, а Норильск является крупнейшим городом, расположенном именно в арктическом климатическом поясе. Таким образом, АЗРФ является единственным географическим регионом Арктики, в котором возможно изучать влияние городской застройки и инфраструктуры на микроклимат территории. В последние годы для решения этой задачи была создана специальная сеть наблюдений UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign), обеспечивающая сбор данных о городском острове тепла, повторяемости приземных инверсий и их пространственной неоднородности (Konstantinov et al., 2018). К настоящему времени измерения на сети UHIARC проведены в Апатитах, Мурманске, Воркуте, Салехарде, Надыме, Новом Уренгое и Норильске. На рис. 3.2.8 показаны города, располагающиеся согласно классификации Кеппена – Гейгера в областях субарктического континентального (разновидности: Dfc, Dwc, Dsc, Dfd, Dwd, Dsd) и полярного (разновидности: ET и EF) климата, ранжированные в зависимости от численности населения.

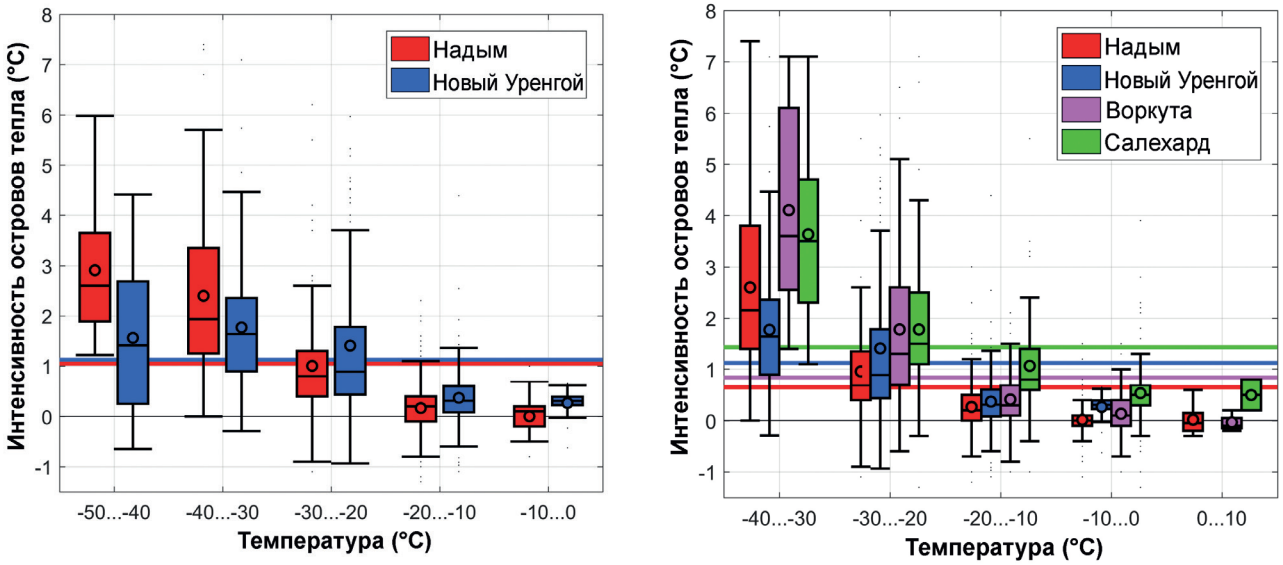



***Рис. 3.2.9*** *Зависимость интенсивности островов тепла в городах Надым, Новый Уренгой, Воркута и Салехард от температуры за пределами города по наблюдениям зимой 2016-2017 гг. (Konstantinov et al., 2018)*

Поскольку общие данные относительно наблюдаемых трендов температуры отражены в предыдущих главах настоящего доклада (см. главы 1.1.1 и 1.2.1), в данном разделе рассматриваются исключительно микроклиматические особенности городов российской Арктики, так как в силу экстремально развитых островов тепла в зимний период, города могут являться «окнами в будущее», в которых можно видеть, что будет происходить с экосистемами Арктики в ближайшие десятилетия (Esau et al., 2021). Так, в Норильске и в Апатитах различия единичных измерений температур между центром города и окрестностями доходит до 5-8 °C, а средняя годовая интенсивность острова тепла в Надыме лишь немногим не доходит до 1 °C (для сравнения в Москве, население которой превосходит население Надыма более, чем в 200 раз, интенсивность острова тепла выше всего лишь в 2-2,2 раза (Konstantinov et al., 2018)). Важно отметить, что наибольшей интенсивности острова тепла достигают при сильных морозах (рис. 3.2.8), особенно в ночное время и в период полярной ночи.

Микроклимат городов в высоких широтах определяется городской застройкой и эмиссиями антропогенного тепла и особо чувствителен к естественным особенностям ландшафта, в первую очередь, к рельефу. В условиях долгоживущих зимних инверсий температура воздуха даже на невысоких холмах может быть значительно выше, чем на окружающих низменностях (Демин и др., 2016). Например, город Апатиты расположен на холме высотой около 50 м, а ближайшая метеостанция Росгидромета (WMO ID 22213) – на берегу озера Имандра в двух км от города. В результате разность температуры в центре города Апатиты и на метеостанции в ясные и безветренные зимние дни может превышать 12 °C, причем вклады орографии и эффекта городского острова тепла в данном случае приблизительно равны (Varentsov et al., 2018).

***Таблица 3.2.1***

*Тренды температуры воздуха и индексов комфортности PET, UTCI и Wind Chill для Архангельска, Кандалакши, Салехарда, Мурманска, Нарьян-Мара, Анадыря и Надыма (Semenova et al., 2019)*

| Город | ΔT | ΔPET | | ΔUTCI | | ΔWind Chill | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | За 10 лет | За 10 лет | За 50 лет | За 10 лет | За 50 лет | За 10 лет | За 50 лет |
| Мурманск | 0,45 | 0,54 | 2,71 | 0,68 | 3,42 | 0,60 | 2,99 |
| Кандалакша | 0,45 | 0,61 | 3,05 | 1,10 | 5,48 | 0,65 | 3,25 |
| Архангельск | 0,45 | 0,69 | 3,47 | 1,22 | 6,10 | 0,72 | 3,60 |
| Нарьян-Мар | 0,52 | 0,78 | 3,90 | 1,68 | 8,41 | 0,93 | 4,65 |
| Салехард | 0,53 | 0,67 | 3,33 | 0,82 | 4,08 | 0,41 | 2,04 |
| Надым | 0,54 | 0,50 | 2,51 | 0,47 | 2,36 | 0,60 | 2,99 |
| Анадырь | 0,36 | 0,30 | 1,48 | 0,29 | 1,47 | 0,56 | 2,79 |

Оценки изменений термического комфорта для конкретных условий городской застройки, выполненные в (Semenova et al., 2019) для Архангельска, Кандалакши, Салехарда, Мурманска, Нарьян-Мара, Анадыря и Надыма по данным опорных метеорологических станций за период 1966-2017 гг. (см. рис. 3.2.9) показывают, что для каждого населенного пункта эти изменения уникальны, однако в среднем для всех рассмотренных городов тренд температуры воздуха составляет 0,47, тренд индекса физиологически-эквивалентной температуры (PET) – 0,57, а универсального индекса термического комфорта (UTCI) – 0,9 °C/10 лет.

Индекс комфортности PET характеризует условия опасной жары, а универсальный индекс термического комфорта UTCI – зимние условия. Данные таблицы 3.2.1 показывают, что рост температуры в городах Арктики происходит за последние десятилетия в среднем в два раза медленнее, чем смягчение условий холодового дискомфорта. Наблюдаемая зимой аномалия температуры соответствует региональному

потеплению, которое ожидается в Салехарде к 2060, в Надыме – к 2040 г. (рис. 3.2.10). Следует упомянуть, что остров тепла также оказывает влияние и на фенологические изменения растительности (Miles, Esau, 2016).

Важно отметить, что в силу частых и интенсивных температурных инверсий, арктические города более подвержены рискам высокого атмосферного загрязнения как от промышленных выбросов, так и от увеличивающегося риска лесных пожаров, пыльных бурь, формирования вторичных аэрозолей. Уровень регионального атмосферного загрязнения в Арктике формируется как от внутренних источников, которыми являются города, так и от источников в средних широтах (Mahura et al., 2018), при этом выпадение в Арктике аэрозолей окисей углерода (сажи) на лед и снег снижает альбедо подстилающей поверхности, что содействует глобальному потеплению (IPCC WG1, 2021; Бакланов и др., 2012).

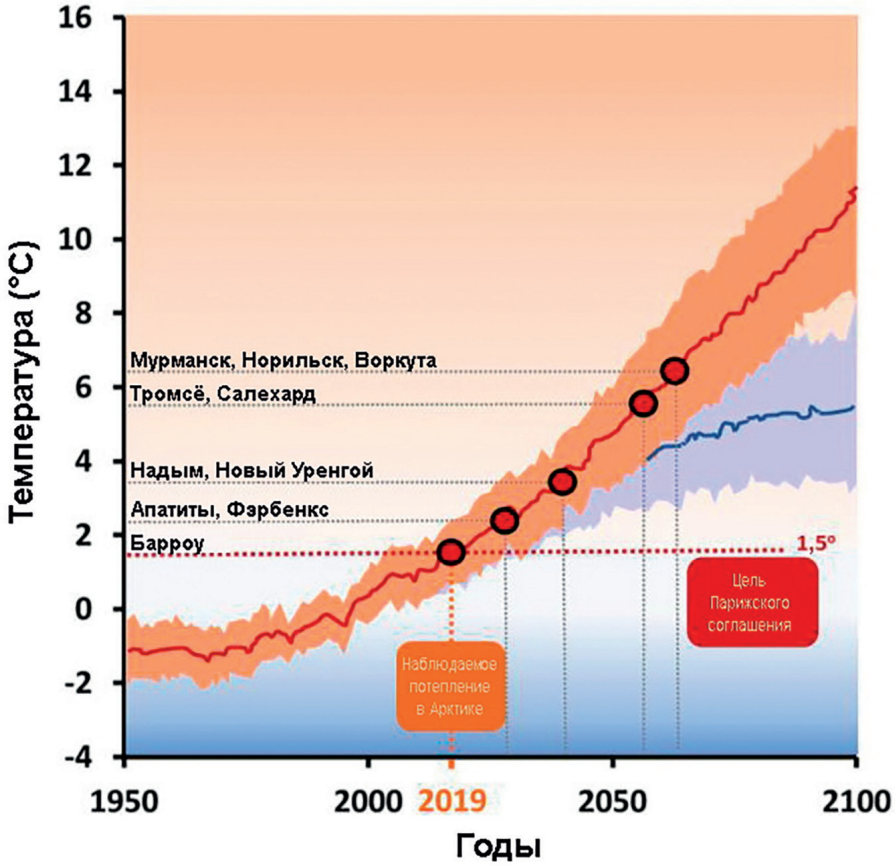



***Рис. 3.2.10*** *Изменение температуры зимнего сезона в Арктике (60-90° с.ш.)*

*Красная линия – среднее по ансамблю для сценария RCP8.5, синяя – то же для сценария RCP4.5. Заштрихованные области обозначают ± одно стандартное отклонение от среднего по ансамблю (Overland et al., 2014; AMAP, 2019). Наблюдаемые значения острова тепла показаны в виде красных точек, совмещенных с ожидаемыми будущими аномалиями температуры в Арктике. Адаптировано из (Esau I. et al., 2020)*

### 3.2.5 Климатические перспективы городов Российской Федерации. Комплексный подход к развитию климатически «умных» и устойчивых городов

Большинство природных бедствий (около 90%), затрагивающих городские районы, связаны с опасными гидрометеорологическими явлениями, число которых в последние десятилетия увеличивается (UN HABITAT-III, 2016). Города ответственны не только за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, но и за производство до 70% выбросов парниковых газов, которые вызывают крупномасштабные изменения климата. Поэтому вопросы развития городов должны рассматриваться в комплексе в рамках реализации Целей устойчивого развития в России, в том числе Цели 11: Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.

Как отмечалось выше, в урбанизированных территориях воздействие единичного экстремального природного явления может привести к каскадному появлению новых явлений, приводящих к нарушению условий жизни города. Стихийные бедствия в городской среде с высокой плотностью населения могут оказывать значительное воздействие на существующую инфраструктуру и услуги, требуя срочного смягчения последствий и планирования ответных мер адаптации к климатическим вызовам.
На фоне происходящих климатических изменений растущие города и урбанизированные территории будут все более ощущать последствия того, что определяется как «кризис»: от экологических последствий и сбоев инфраструктуры до нехватки продовольствия, ресурсов и повышения смертности.

Стратегия адаптации городов к изменению климата должна включать следующие требования (Cities IPCC, 2019):

- Расширение системы наблюдения за здоровьем и раннего предупреждения с использованием технологий и социальных сетей, особенно для пожилых, очень молодых и бедных.
- Уменьшение эффекта городского острова тепла с использованием пассивных подходов: посадка деревьев, зеленые и светоотражающие крыши и проницаемые тротуары.
- Разработка стратегий устойчивости водных и энергетических систем к изменению климата, играющих ключевую роль в защите населения во время и после экстремальных погодных явлений.
- Регулирование заселения в поймах рек и на побережьях морей для сведения к минимуму воздействия прибрежных штормов и наводнений на суше.
- Поддержание роста городов, ориентированных на использование экологически чистой энергии.

Хорошим примером для российских городов является опыт Санкт-Петербурга в вопросах управления адаптацией к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему (Катцов и др., 2018; Серебрицкий, 2020). В Санкт-Петербурге на уровне стратегических документов создана базовая правовая платформа, позволяющая разрабатывать региональные планы мероприятий по адаптации к изменениям климата с привлечением всех профильных подразделений Правительства города посредством отраслевых государственных программ. Ре-

ализация адаптационной политики Санкт-Петербурга предусматривает необходимость разработки планов адаптационных мероприятий для каждой отрасли городского хозяйства, что подразумевает, в соответствии с мировой практикой, определение климатических угроз, вероятности их проявления, оценку уязвимости к климатическим изменениям объектов городской инфраструктуры, экосистем и групп населения и последующую оценку климатических рисков (Серебрицкий, 2020). Как подчеркивается в этом документе, единственной и безальтернативной структурой, созданной в Российской Федерации для установки правил наблюдения за климатической системой, развитием климатических моделей, составлением прогнозов и перспективных оценок изменений климата, а также оценки климатических воздействий и связанных с ними аспектов управления, обработки и интерпретации данных наблюдений и моделирования с целью планирования мероприятий по адаптации и последующего мониторинга их эффективности и соответствующей корректировки, является Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Санкт-Петербург, учитывая наличие в городе как опыта в области адаптации к климатическим изменениям, так и научного и образовательного потенциала, мог бы стать пилотным регионом России при разработке модельных планов адаптации как для городов, так и для различных секторов экономики.

Предприняты также и усилия по составлению плана адаптации для самого большого российского мегаполиса – г. Москва (Гашо и др., 2017). Разработанный и активно дополняемый план адаптации является комплексным, и несмотря на преобладание технических мер (на настоящий момент), в нем предполагается уделить большое внимание мониторингу опасных климатических явлений (волн тепла, шквалистых усилений ветра, обильных осадков) и налаживанию взаимодействия разных ведомств. В рамках этих инициатив также был проанализирован опыт адаптации городов Европейского Союза к изменениям климата и его применимость для г. Москва (Молчанова и др., 2017).

Для крупнейшего города Арктики – Мурманска стратегии адаптации обсуждаются с начала XXI века: этот регион расценивается как один из типовых для адаптации всей АЗРФ к климатическим изменениям (Комплексные климатические стратегии, 2009)

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) содействует созданию безопасных, здоровых и устойчивых городов посредством развития интегрированного (комплексного) городского метеорологического, экологического и климатического обслуживания (WMO, 2019). Цель состоит в том, чтобы создать городские службы, отвечающие особым потребностям городов, за счет сочетания плотных сетей наблюдений, прогнозов с высоким разрешением, систем раннего предупреждения о множественных опасностях, планов управления рисками, связанными со стихийными бедствиями, и климатического обслуживания. Такой подход дает городам инструменты, необходимые для сокращения выбросов, адаптации к изменениям климата, создания карбон-нейтральных и экологически комфортных городов, процветающих и устойчивых сообществ и реализации Целей устойчивого развития ООН.

## Список литературы


**Бакланов А., Махура А., Назаренко Л., Тауснев Н., Кучин А., Ригина О., 2012:** Загрязнение атмосферы и изменение климата в северных широтах – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – 106 с.

**Булдакова Е. Д., Костикова В. А., 2021:** Анализ влияния растительного покрова на эффект городского острова тепла с использованием геоинформационных систем на примере г. Ставрополя // Сборники конференций НИЦ Социосфера. – № 21. – С. 19-25.

**Газимов Т. Ф., Чурсин В. В., 2021:** Городской остров тепла над Новосибирском в период аномально жаркой погоды летом 2019 года / В сб.: XIV Труды Сибирского совещания и школы молодых ученых по климато-экологическому мониторингу – Томск. – С. 53-56.

**Гашо Е. Г., Степанова М. В., Гусева Т. В. 2017:** Подходы к формированию стратегии адаптации к изменению климата на примере города Москвы // Вестник российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. – Т. 2, № VIII. – С. 136-146.

**Гинзбург А. С., Демченко П. Ф., 2017:** Обратные связи температурного режима и энергопотребления урбанизированных территорий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – Т. 53, № 5. – С. 751-759.

**Гинзбург А. С., Докукин С. А., 2021:** Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) //. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – Т. 57, № 1. – С. 53-66.

**Гинзбург А. С., Евсиков И. А., Фролькис В. А, 2021:** Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – Т. 57, № 5. – С. 526-–538.

**Гинзбург А. С., Решетарь О. А., Белова И. Н., 2016:** Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. – № 9. – С. 20-27.

**Гурьянов Д. А., 2016:** Изменчивость климатических сезонов года и экстремальных характеристик температуры воздуха в Санкт-Петербурге и на территории Ленинградской области в условиях современных изменений климата – автореферерат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук, Санкт-Петербург. – 22 с.

**Демин В. И., Козелов Б. В., Елизарова Н. И., Меньшов Ю. В., Константинов П. И., 2016:** Роль рельефа в возникновении «острова тепла» в городе Апатиты // Фундаметальная и прикладная климатология. – Т. 2. – С. 95-106.

**Дудорова Н. В., Белан Б. Д., 2016а:** Оценка интенсивности и размеров острова тепла и влаги в г. Томск на основе прямых измерений // Оптика атмосферы и океана. – Т. 29, № 5. – С. 419-425.

**Дудорова Н. В., Белан Б. Д., 2016б.** Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томск // Оптика атмосферы. и океана. – Т. 29, № 5. – С. 426-436.

**Емелина С. В., Константинов П. И., Малинина Е. П., Рубинштейн К. Г., 2014:** Оценка информативности некоторых биометеорологических индексов для разных районов России // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 25-37.

**Замолодчиков Д., Краев Г., 2016:** Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. – № 4 (48). – С. 23-31.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Акентьева А. А., Ефимов С. В., Мещерская А. В., Пикалева А. А., 2018:** Изменение климата на территории Санкт-Петербурга в контексте глобального потепления /В кн.: Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2017 году, ежегодный обзор – СПб: ООО «Сезам-Принт», 2018. – С. 78-84.

**Кислов А. В., Алексеева Л. И., Варенцов М. И., Константинов П. И., 2020:** Изменения климата и экстремальные явления погоды в Московской агломерации // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 64-76.

**Кислов А. В., Варенцов М. И., Горлач И. А., Алексеева Л. И., 2017:** «Остров тепла» Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – № 4. – С. 12-19.

**Климат Москвы в условиях глобального потепления, 2017:** под ред. А. В. Кислова – М.: Издательство Московского университета. – 288 с.

**Клименко В. В., Гинзбург А. С., Демченко П. Ф., Терешин А. Г., Белова И. Н., Касилова Е. В., 2016:** Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // Доклады Академии Наук. – Т. 470, № 5. – С. 519-524.

**Комплексные климатические стратегии для устойчивого развития регионов российской Арктики в условиях изменения климата, 2009:** Модельный пример Мурманской области / В. Х. Бердин, Д. А. Гершинкова, Ю. С. Добролюбова, В. А. Маслобоев – М.: Российский региональный экологический центр. – 86 с.

**Кораблева Е. Г., Ленская О. Ю., 2010:** Исследования острова тепла города Челябинска в зимний период // Вестник Челябинского государственного университета. – № 8. – С. 15-23.

**Константинов П. И., Куканова Е. А., 2014:** Городские острова тепла Российской Федерации: основные характеристики и проблемы изучения / In Proceedings of International Conference and Young Scientists School on Computational Information Technologies for Environmental Sciences: "ENVIROMIS-2014, Tomsk, Russia, v. 29, pp. 162-164.

**Локощенко М. А., Енукова Е. А., 2021:** Острова тепла малых городов и деревень Московского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – Т. 500, № 2. – С. 200-207.

**Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г., Цепелев В. Ю., 2020:** Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – № 2 (376). – С. 109-125.

**Малинин В. Н., Менжулин Г. В., Павловский А. А., 2016:** Градостроительное планирование Санкт-Петербурга в условиях современных изменений климата // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – № 43. с. 140-147.

**Молчанова Я. П., Гусева Т. В., Малков А. В., Коновалова Ю. А., Бегак М. В., 2017:** Адаптация к изменению климата как элемент планирования: возможность применения европейского опыта для г. Москвы // Вестник российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. – Т. 2(VIII). – С. 163-171.

**Оганесян В. В., 2019:** Климатические изменения как факторы риска для экономики России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – № 3 (373). – С. 161-184.

**Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу, 2011:** Под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева – М.: Д'Арт. – 252 с.

**Попова И. В., Куролап С. А., Виноградов П. М., 2018:** Моделирование «городского острова тепла» средствами геоинформационного анализа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – № 2(5). – С. 87-95.

**Ревич Б. А., 2011:** Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека. – № 7. – С. 3-9.

**Росгидромет, 2014:** Второй Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (Катцов В. М., Семенов С. М., ред.) – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Росгидромет, 2017:** Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова – СПб: Амирит. – 106 с.

**Серебрицкий И. А., 2020:** Опыт Санкт-Петербурга в вопросах управления адаптацией к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему (информационно-аналитическая записка) / Web-source: http://www.infoeco.ru/index.php?id=8780.

**Стрежалковская В. Р., Поталова Е. Ю., 2018:** Анализ изменения микроклимата владивостока в условиях интенсивного развития города / В кн.: Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» – СПб: ХИМИЗДАТ. – 753 с.

**Сутырина Е. Н., 2020:** Изучение параметров городских «островов тепла» на территории Иркутской области по данным дистанционного зондирования // Известия Иркутского государственного университета, Серия «Науки о Земле». – Т. 34. – С. 131-140. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.131.

**Танский А. О., Мазуров Г. И., 2010:** Анализ острова тепла над некоторыми городами Российской Федерации // Метеорологический Вестник. – Т. 3, № 3. – С. 80-122.

**Фалолеева М. А., 2020:** Новый город для нового климата –. Минск: Дискурс. – 432 с.

**AMAP, 2019:** Arctic Monitoring and Assessment Programme climate change update 2019: An update to key findings of snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) – Oslo, Norway, 12 p.

**Baklanov A., Grimmond C. S. B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R. K., Hovsepyan A., 2018:** From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services // Urban Climate, v. 23, pp. 330-341, DOI10.1016/j.uclim.2017.05.004.

**Baklanov A., Molina L. T., Gauss M., 2016:** Megacities, air quality and climate // Atmospheric Environment, v. 126, pp. 235-249. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.059.

**Bondur V. G., Mokhov I. I., Voronova O. S., Sitnov S.A, 2020:** Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // Doklady Earth Sciences, v. 492(1), pp. 370-375.

**Buehley R. W., Van Bruggen J., Truppi L. E., 1972:** Heat Islands equals Death Island? // Environmental Research, v. 5, pp. 85-92.

**Cities IPCC, 2019:** Extended version: Global Research and Action Agenda on Cities and Climate Change Science / Authored by: Anne-Hélène Prieur-Richard et al. Web-source: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/Research-Agenda-Aug-10_Final_Long-version.pdf.

**Colette A., Andersson, Baklanov A., Bessagnet B., Brandt J., Christensen J. H., Doherty R., Engardt M., Geels C., Giannakopoulos C., Hedegaard G. B., Katragkou E., Langner J., Lei H., Manders A., Melas D., Meleux F., Rouïl L., Sofiev M., Soares J., Stevenson D. S., Tombrou-Tzella M., Varotsos K. V., Young P., 2015:** On the robustness of the ozone climate penalty in Europe // Environmental Research Letters, v. 10, p. 084015.

**Doherty R. M., Wild O., Shindell D. T., Zeng G., MacKenzie I. A., Collins W. J., Fiore A. M., Stevenson D. S., Dentener F. J., Schultz M. G., Hess P., Derwent R. G., Keating T. J., 2013:** Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study // Journal pf Geophysical Research Atmosphere, v. 118, pp. 3744-3763, doi:10.1002/jgrd.50266.

**Esau, I., Bobylev L., Donchenko V., Gnatiuk N., Lappalainen H. K., Konstantinov P., Kulmala M., Mahura A., Makkonen R., Manvelova A., Miles V., Petäjä T., Poutanen P., Fedorov R., Varentsov M., Wolf T., Zilitinkevich S., Baklanov A., 2021:** An enhanced integrated approach to knowledgeable high-resolution environmental quality assessment // Environmental Science and Policy, v. 122, pp. 1-13.

**Esau I., Varentsov M., Laruelle M., Miles M. W., Konstantinov P., Soromotin A., Baklanov A. A., Miles V. V., 2020:** Warmer Climate of Arctic Cities, Chapter 3 in the monography "The Arctic: Current Issues and Challenges", Pokrovsky O., et al. (Eds) – NOVA Publishers, ISBN: 978-1-53617-306-2.

**Giannaros T. M., Kotroni V., Lagouvardos K., Matzarakis A., 2018:** Climatology and trends of the Euro-Mediterranean thermal bioclimate // International Journal of Climatology, v. 38, № 8, pp. 3290-3308.

**Hinkel K. M., Nelson F. E., Klene A. E., Bell J. H., 2003:** The urban heat island in winter at Barrow, Alaska // International Journal of Climatology, v. 23(15), pp. 1889-1905. https://doi.org/10.1002/joc.971.

**Howard L., 1818:** The Climate of London, v.1 – London: W. Phillips, P. 755.

**IPCC, 2021:** Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Pan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yeleki, R. Yu and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press.

**Jacob D. J., Winner D. A., 2009:** Effect of climate change on air quality // Atmospheric Environment, v. 43(1), pp. 51-63, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051.

**Jacobs S. J., Pezza A. B., Barras V., Bye J., Vihma T., 2013:** An analysis of the meteorological variables leading to apparent temperature in Australia: Present climate, trends, and global warming simulations // Global Planetary Change, v. 107, pp. 145-156.

**Jendritzky G., Dear R. de, Havenith G., 2012:** UTCI-Why another thermal index? International // Journal of Biometeorology, v. 56, № 3, pp. 421-428.

**Konovalov I. B., Beekmann M., Kuznetsova I. N., Yurova A., Zvyagintsev A. M., 2011:** Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 11, 10031e10056. http://dx.doi.org/10.5194/acp-11-10031-2011.

**Konstantinov P., Shartova N., Varentsov M., Revich B., 2020:** Evaluation of outdoor thermal comfort conditions in northern Russia over 30-year period: Arkhangelsk region // Geographica Pannonica, v. 24, « 4, pp. 252-260.

**Konstantinov P., Tattimbetova D., Varentsov M., Shartova N., 2021:** Summer thermal comfort in Russian big cities (1966-2015)// Geographica Pannonica, v. 25, № 1, pp. 35-41.

**Konstantinov P. I., Varentsov M. I., Malinina E. P., 2014:** Modeling of thermal comfort conditions inside the urban boundary layer during Moscow's 2010 summer heat wave (case-study) // Urban Climate, v. 10, Part 3, pp. 563-572. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.05.002.

**Konstantinov P., Varentsov M., Esau I., 2018:** A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // Environmental Research Letters, v. 13, p. 075007 https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84.

**Laruelle M., Esau I., Miles M., Miles V., Kurchatova A. N., Petrov S. A., Soromotin A., Varentsov M., Konstantinov P., 2019:** Arctic cities as an anthropogenic object: a preliminary approach through urban heat islands // Polar Journal, v. 9, pp. 402-423.

**Lee D. O., 1992:** Urban Warming? An Analysis of Recent Trends in London's Heat Island // Weather, v. 47, pp. 50-56. http://dx.doi.org/10.1002/j.1477-8696.1992.tb05773.x.

**Liu W., Ji C., Zhong J., Jiang X., Zheng Z., 2007:** Temporal characteristics of the Beijing urban heat island // Theoretical and Applied Climatology, v. 87, pp. 213-221. https://doi.org/10.1007/s00704-005-0192-6.

**Magee N., Curtis J., Wendler G., 1999:** The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // Theoretical and Applied Climatology, v. 64, pp. 39-47. https://doi.org/10.1007/s007040050109.

**Mahura A., Gonzalez-Aparicio I., Nuterman R., Baklanov A., 2018:** Seasonal Impact Analysis on Population due to Continuous Sulphur Emissions from Severonikel Smelters of the Kola Peninsula // Geography, Environment, Sustainability, v. 11(1), pp. 130-144. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-130-144.

**Miles V. V., Esau, I., 2016:** Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern West Siberia // Environmental Research Letters, v. 11, p. 115002 https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/115002.

**Mokhov I. I., Bondur V. G., Sitnov S. A., Voronova O. S., 2020:** Satellite Monitoring of Wildfires and Emissions into the Atmosphere of Combustion Products in Russia: Relation to Atmospheric Blockings // Doklady Earth Sciences, v. 495(2), pp. 921-924.

**Myhre G., Samset B. H., Schulz M., Balkanski Y., Bauer S., Berntsen T. K., Bian H., Bellouin N., Chin M., Diehl T., Easter R. C., Feichter J., Ghan S. J., Hauglustaine D., Iversen T., Kinne S., Kirkevåg A., Lamarque J.-F., Lin G., Liu X., Lund M. T., Luo G., Ma X., van Noije T., Penner J. E., Rasch P. J., Ruiz A., Seland Ø., Skeie R. B., Stier P., Takemura T., Tsigaridis K., Wang P., Wang Z., Xu L., Yu H., Yu F., Yoon J.-H., Zhang K., Zhang H., Zhou C., 2013:** Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 13, pp. 1853-1877, doi:10.5194/acp-13-1853-2013.

**Napoli C. Di, Barnard C., Prudhomme C., Cloke H. L., Pappenberger F., 2020:** ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis // Geoscientific Data Journal, № June. p. gdj3.102.

**Nefedova T., 2021:** The 2010 Catastrophic Forest Fires in Russia: Consequence of Rural Depopulation?. In: Karcsonyi D., Taylor A., Bird D. (eds) The Demography of Disasters. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49920-4_4.

**Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A., 2017:** Urban Climates – Cambridge: Cambridge University Press, 509 p.

**Overland J. E., Wang M., Walsh J. E., Stroeve J. C., 2014:** Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales // Earth's Future, v. 2 (2), pp. 68-74. https://doi.org/10.1002/2013EF000162.

**Potchter O., Cohen P., Lin T. P., Matzarakis A., 2018:** Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification // Science and Total Environment, v. 631-632, pp. 390-406.

**Semenova A. A., Konstantinov P. I., Varentsov M. I., Samsonov T. E., 2019:** Modeling the dynamics of comfort thermal conditions in Arctic cities under regional climate change // IOP Conference Series Earth Environmental Science, v. 386, p. 012017.

**Shaposhnikov D., Revich B., Bellander T., Bedada G. B., Bottai M., Kharkova T., Kvasha E., Lezina E., Lind T., Semutnikova E., Pershagen G., 2014:** Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010 // Epidemiology, May; v. 25(3), pp. 359-364. doi: 10.1097/EDE.0000000000000090. PMID: 24598414; PMCID: PMC3984022.

**Skjøth C. A., Geels C., 2013:** The effect of climate and climate change on ammonia emissions in Europe// Atmospheric Chemistry and Physics, v. 13, pp. 117-128, https://doi.org/10.5194/acp-13-117-2013, 2013.

**Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O., 2019:** Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters, v. 14, p. 025003.

**Tan J., Zheng Y., Tang X., Guo C., Li L., Song G., Zhen X., Yuan D., Kalkstein A. J., Li F., 2010:** The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. International // Journal of Biometeorology, January; v. 54(1), pp. 75-84. doi: 10.1007/s00484-009-0256-x. PMID: 19727842.

**UN DESA, 2018:** 2018 Revision of World Urbanization Prospects | Multimedia Library – United Nations Department of Economic and Social Affairs. UN Department of Economic and Social Affairs, https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html.

**UN HABITAT, 2016:** The new UN Urban Agenda, The document adopted at the Habitat III Conference in Quito, Ecuador, October 2016. https://habitat3.org/the-newurban-agenda.

**van Hove L. W. A., Steeneveld G. J., Jacobs C. M. J., Heusinkveld B. G., Elbers J. A., Moors E. J., Holtslag A. A. M., 2011:** Exploring the urban heat island intensity of Dutch cities: assessment based on a literature review, recent meteorological observation and datasets provide by hobby meteorologists // Alterra report, № 2170. https://edepot.wur.nl/171621.

**Varentsov M., Shartova N., Grischenko M., Konstantinov P., 2020a:** Spatial Patterns of Human Thermal Comfort Conditions in Russia: Present Climate and Trends // Weather, Climate and Society, v. 12, No. 3, pp. 629-642.

**Varentsov M. I., Konstantinov P. I., Shartova N. V., Samsonov T. E., Kargashin P. E., Varentsov A. I., Fenner D., Meier F., 2020б:** Urban heat island of the Moscow megacity: the long-term trends and new approaches for monitoring and research based on crowdsourcing data // IOP Conference Series Earth Environmental Science, v. 606, p. 012063.

**Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M., 2020в:** Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment // Atmosphere, v. 11(12), pp. 1-31. https://doi.org/10.3390/atmos11121349.

**Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R, 2018.:** Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmospheric Chemistry and Physics, v. 18, pp. 17573-17587, https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018.

**Vinogradova V. V., 2019:** Universal thermal climate index in Russia // Izvestia Rossijskoj Akademii Nauk. Seriya Geograhia, № 2, pp. 3-19.

**Vinogradova V. V., Zolotokrylin A. N., 2014:** Current and Future Role of Climatic Factor in the Estimation of Natural Conditions of Life in Russia // Izvestia Rossijskoj Akademii Nauk, Seriya Geograhia, № 4, pp. 16-21.

**Voronova O. S., Zima, A. L., Kladov V. L. Cherepanova E. V., 2020:** Anomalous Wildfires in Siberia in Summer 2019 // Izvestia Atmospheric and Ocean Physics, v. 56, pp. 1042-1052. https://doi.org/10.1134/S000143382009025X.

**Wilby R. L., 2003:** Past and projected trends in London's urban heat island // Weather, v. 58, pp. 251-260. https://doi.org/10.1256/wea.183.02.

**WMO, 2019:** Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services. Volume 1: Concept and Methodology. World Meteorological Organization, Geneva, WMO-№ . 1234.

**WHO, 2021:** WHO global air quality guidelines. Particulate matter ($PM_{2.5}$ and $PM_{10}$), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide / Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

**Zemtsov S., Shartova N., Varentsov M., Konstantinov P., Kidyaeva V., Shchur A., Timonin S., Grischchenko M., 2020:** Intraurban social risk and mortality patterns during extreme heat events: A case study of Moscow, 2010-2017 // Health and Place, v. 66, № September, p. 102429.

## 3.3 Арктическая зона Российской Федерации

*А. С. Макаров, Е. М. Акентьева, А. А. Пикалева, Н. Е. Терентьев, Д. В. Фасолько, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник*

### Введение

С точки зрения развития национальной экономики – с учетом геополитических реалий – территории, относящиеся к Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ)[1], представляют стратегический интерес. Экономический потенциал российской Арктики оценивается специалистами достаточно высоко (Бакланов и др., 2015; Лексин, Порфирьев, 2016). Это связано не только с большими запасами в регионе углеводородов, руд цветных металлов и золота, алмазов, агрохимического сырья, наличием крупных металлургических и машиностроительных предприятий, атомного флота и др. (Елисеев, Семенов, 2016; Катцов и др., 2017а; Макаров и др., 2022; Спорышев и др., 2018; Box et al., 2019; Overland et al., 2017; 2019; Мохов, 2020), но и с происходящими и ожидаемыми климатическими изменениями, которые, в частности, приведут к облегчению доступа в Арктику и возрастанию значимости Северного морского пути как трансконтинентального транспортного коридора (Мохов и Хон, 2015; Мохов и др., 2016; Кибанова и др., 2018).

С одной стороны, такая концепция предполагает для АЗРФ разработку в ближней и среднесрочной перспективе крупных инвестиционных проектов, которые потребуют значительных финансовых вложений. Реализация этих проектов сопряжена с разного рода рисками, среди которых особое место занимают климатические риски, требующие учитывать изменения и колебания климата при планировании различных видов хозяйственной деятельности, таких как добыча полезных ископаемых, производство энергии, транспортные операции и т.п. (Катцов, Порфирьев, 2012).

С другой стороны, быстрые изменения климата Арктики влияют на традиционные уклады жизни, здоровье и безопасность населения, угрожают биологическим видам и экосистемам на суше, в пресных и морских водах. Все это требует принятия серьезных мер для смягчения быстро нарастающих климатических и экологических стрессов, сопровождающих расширение экономической и прочей деятельности в этом – одном из наиболее уязвимых регионов планеты (IPCC, 2007).

Таким образом, АЗРФ является одним из важнейших объектов долгосрочных стратегий адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата. Научное обоснование таких стратегий является ключевой задачей планирования на любом уровне (национальном, отраслевом, региональном) и основным этапом планирования адаптации любого объекта (хозяйственного комплекса, вида экономической деятельности, территории). Обоснование включает количественные оценки современных и будущих погодно-климатических рисков, в том числе оценки подверженности и уязвимости объекта, а также допустимых значений рисков с учетом экономических и социальных факторов (Катцов, Порфирьев, 2017).

[1] Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации»

Применение современных технологий сценарного прогнозирования регионального климата позволяет оценить ожидаемые в Арктике изменения и проанализировать риски с учетом различных мезомасштабных факторов, а также сложных взаимодействий вблизи границы раздела сред (Shkolnik, Efimov, 2013; Школьник, Ефимов, 2015; Хлебникова и др., 2018). Дальнейшее развитие методологии прогнозирования с целью количественного описания неопределенностей оценок, связанных с влиянием собственной изменчивости климатической системы, способствует расширению информационной основы управления климатическими рисками (Катцов и др., 2020).

### 3.3.1 Климат АЗРФ и его возможные изменения в будущем

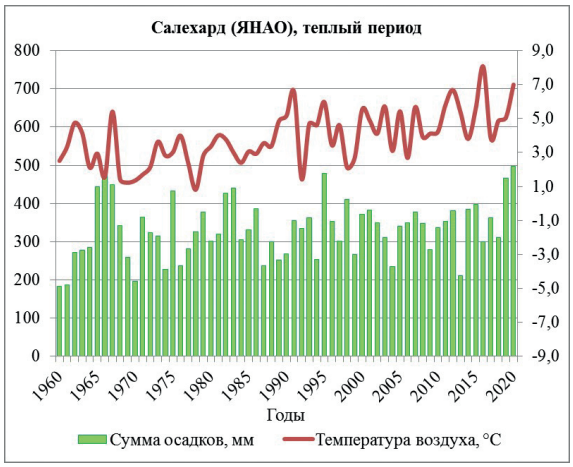
По данным (AMAP, 2021), повышение среднегодовой температуры поверхности (суши и океана) в Арктике с 1971 г. составило 3,1 °С, что в три раза превосходит скорость среднеглобальных изменений. Растет частота и интенсивность событий, связанных с уменьшением площади морского льда, сильными осадками, затоплением внутренних водоемов, абразией морских побережий и лесными пожарами. Отмечается повышение экстремально высоких температур и снижение числа случаев экстремального холода. Аномально холодные периоды, длящиеся более 15 дней, практически перестали наблюдаться в Арктике с 2000 г.

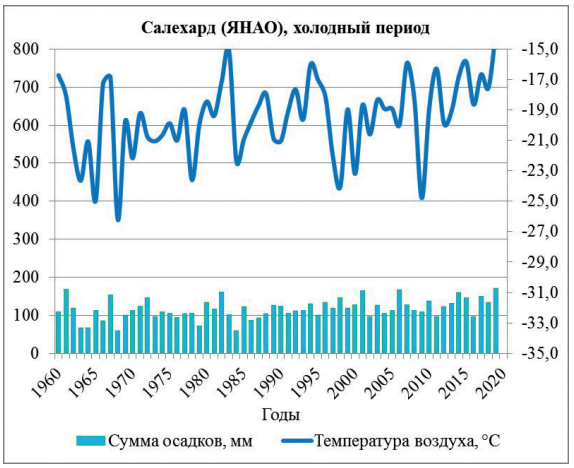
Размеры территории АЗРФ обусловливают разнообразие географических, погодных, климатических и ледовых условий в различных ее частях. Анализ трендов температуры воздуха показывает, что в период 1960-2020 гг. ее наибольший рост как в теплый (апрель – октябрь), так и в холодный (ноябрь – март) периоды года, отмечается на Ямале, Таймыре и побережье Восточно-Сибирского моря (0,5-0,6 °С/10 лет). На севере ЕТР и Чукотке температура воздуха в теплый период растет со скоростью 0,3-0,4 °С/10 лет, в холодный – со скоростью 0,4-0,5 °С/10 лет. Области увеличения количества осадков на АЗРФ чередуются с областями их уменьшения. Так, в теплый период на азиатской территории АЗРФ отмечается уменьшение осадков на 3-6% от нормы, наиболее выраженное на побережье Восточно-Сибирского моря. На севере ЕТР увеличение сумм осадков в этот период года составляет 2-5% от нормы. В холодный период в западном секторе Арктики рост количества осадков достигает 8-10% от нормы. Уменьшение количества осадков на 2-4% от нормы в холодный период характерно для Ямала, побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (рис. 3.3.1).

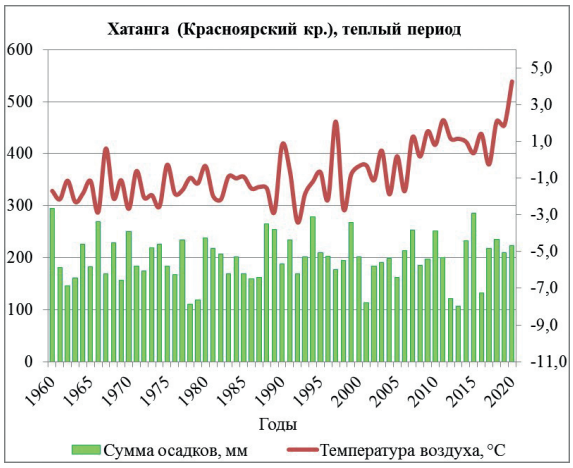
Повторяемость опасных метеорологических явлений (РД 52.27.724-2019, 2019) по территории АЗРФ также значительно различается (рис. 3.3.2, 3.3.3). Основной вклад в годовую повторяемость опасных метеорологических явлений на территории АЗРФ вносят сильные метели и высокие скорости ветра. Исключение составляет территория Восточной Сибири, где среди опасных явлений преобладают низкие температуры воздуха. На Ямале и севере Якутии в этот период было также зафиксировано четыре случая сильной жары (рис. 3.3.3).

Мурманск (Мурманская обл.), теплый период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С

Мурманск (Мурманская обл.), холодный период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С


Салехард (ЯНАО), теплый период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С


Салехард (ЯНАО), холодный период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С


Хатанга (Красноярский кр.), теплый период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С

Хатанга (Красноярский кр.), холодный период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С

Чокурдах (Респ. Саха), теплый период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С

Чокурдах (Респ. Саха), холодный период
Годы
Сумма осадков, мм
Температура воздуха, °С

***Рис. 3.3.1*** *Изменение температуры воздуха (°С, правая вертикальная шкала) и количества осадков (мм, левая вертикальная шкала) в теплый (апрель – октябрь) и холодный (ноябрь – март) периоды года в различных районах АЗРФ в 1960-2020 гг.*

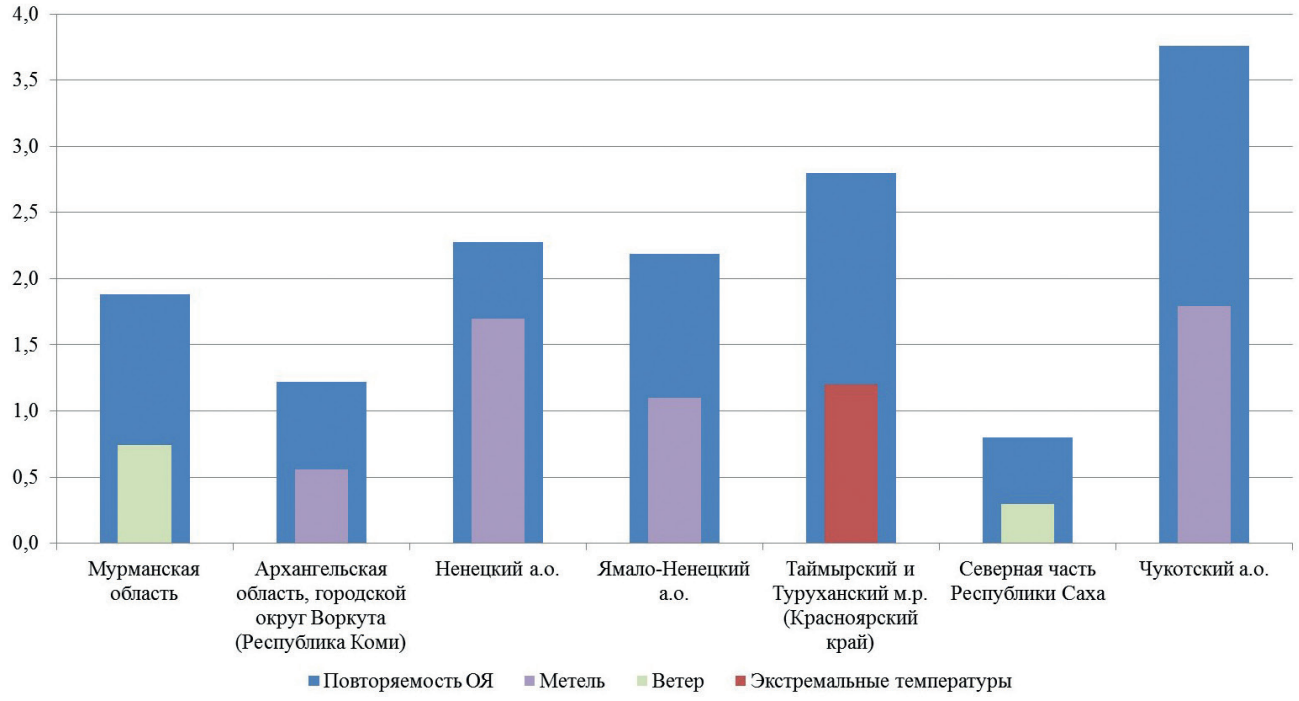



***Рис. 3.3.2*** *Повторяемость опасных метеорологических явлений в различных субъектах АЗРФ (число случаев в год)*

*Цветом выделены наиболее часто повторяющиеся опасные метеорологические явления. Для представленных оценок использованы данные метеорологических ежемесячников: сведения об опасных метеорологических явлениях в соответствии с критериями подразделений Росгидромета в каждом из субъектов на 185 метеостанциях за период 1991-2020 гг.*

*В группу опасных метеорологических явлений «ветер» включены явления «сильный ветер», «смерч», «шквал», в группу опасных метеорологических явлений «экстремальные температуры» – «сильный мороз» и «сильная жара»*

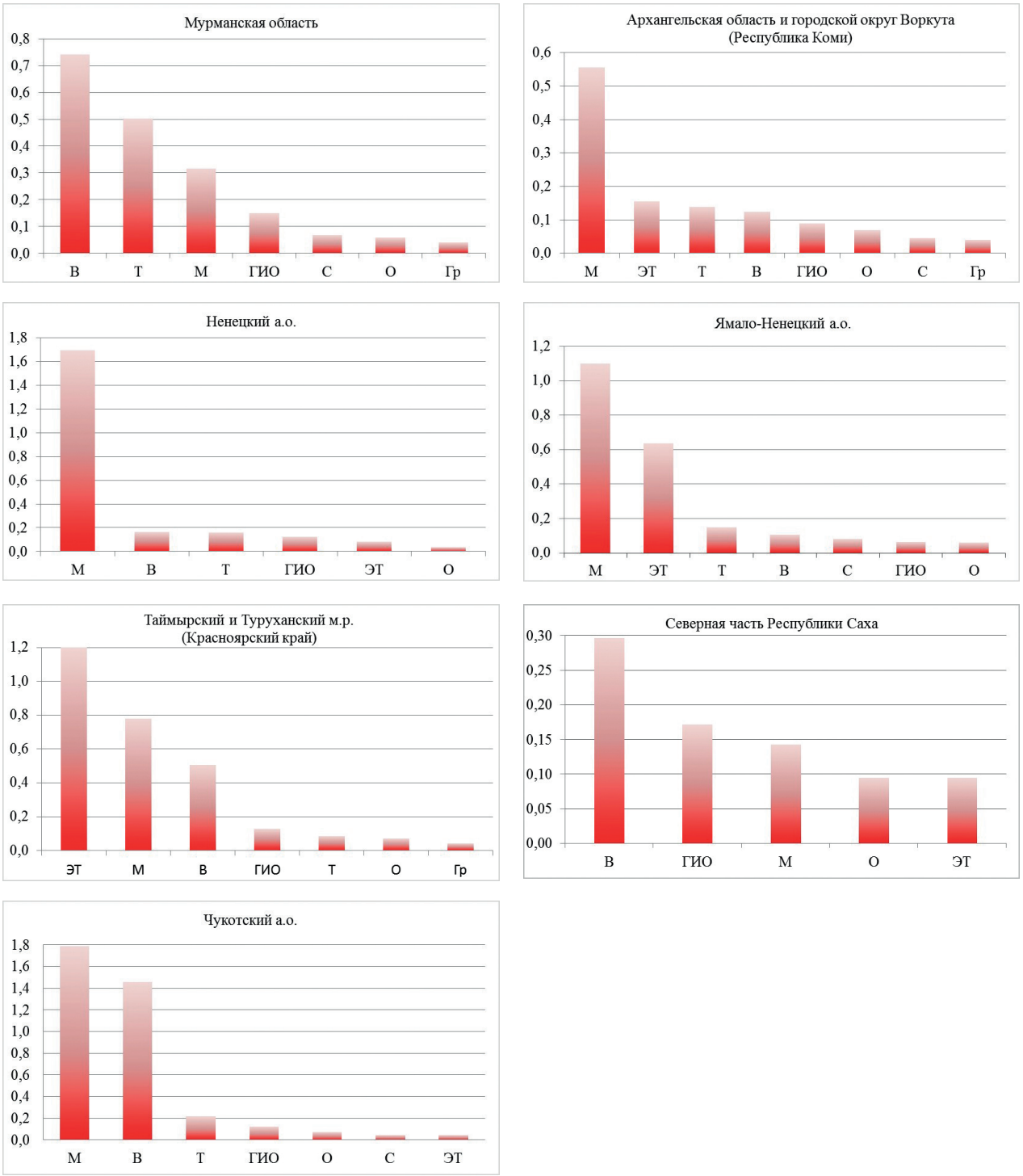



***Рис. 3.3.3*** *Повторяемость различных видов опасных метеорологических явлений в регионах АЗРФ (число случаев в год): «М» – метель, «В» – ветер, «Т» – туман, «ГИО» – гололедно-изморозевые отложения, «О» – осадки, «С» – снег, «ЭТ» – экстремальные температуры, «Гр» – град*

Согласно ансамблевым оценкам, полученным на основе применения технологии регионального климатического моделирования высокого разрешения (Shkolnik et al., 2018) с использованием сценария RCP8.5 (рис. 3.3.4), уже к середине XXI века на территории АЗРФ ожидается существенное повышение температуры воздуха, которое особенно заметно проявится в зимний сезон. Использование здесь наиболее «агрессивного» сценария семейства RCP позволяет оценить «верхнюю границу» будущих изменений климата АЗРФ – именно

такая оценка предпочтительна при разработке системы упреждающей адаптации региона к изменениям климата. Использование других сценариев, включающих более слабое антропогенное воздействие на глобальный климат, не приводит к заметным качественным, а до середины XXI века – и к количественным, различиям в оценках (см. главу 1.2.2). Наибольшая скорость изменения ожидается на территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского АО, а также в прибрежных районах азиатской части АЗРФ (до 1,5 °С/10 лет). В летний сезон потепление гораздо более слабое. Наименее выраженное увеличение температуры воздуха – в среднем около 2 °С к середине XXI века – ожидается на территории Красноярского края.

В зимний сезон на всей территории прогнозируется значительное относительное увеличение сумм осадков. Наибольший рост отмечается на севере азиатской части АЗРФ. В летний сезон увеличение суммы осадков отчетливо проявляется на территории Красноярского края. На северо-востоке региона неопределенность оценок довольно велика, что может быть связано со сложностями моделирования орографических эффектов.

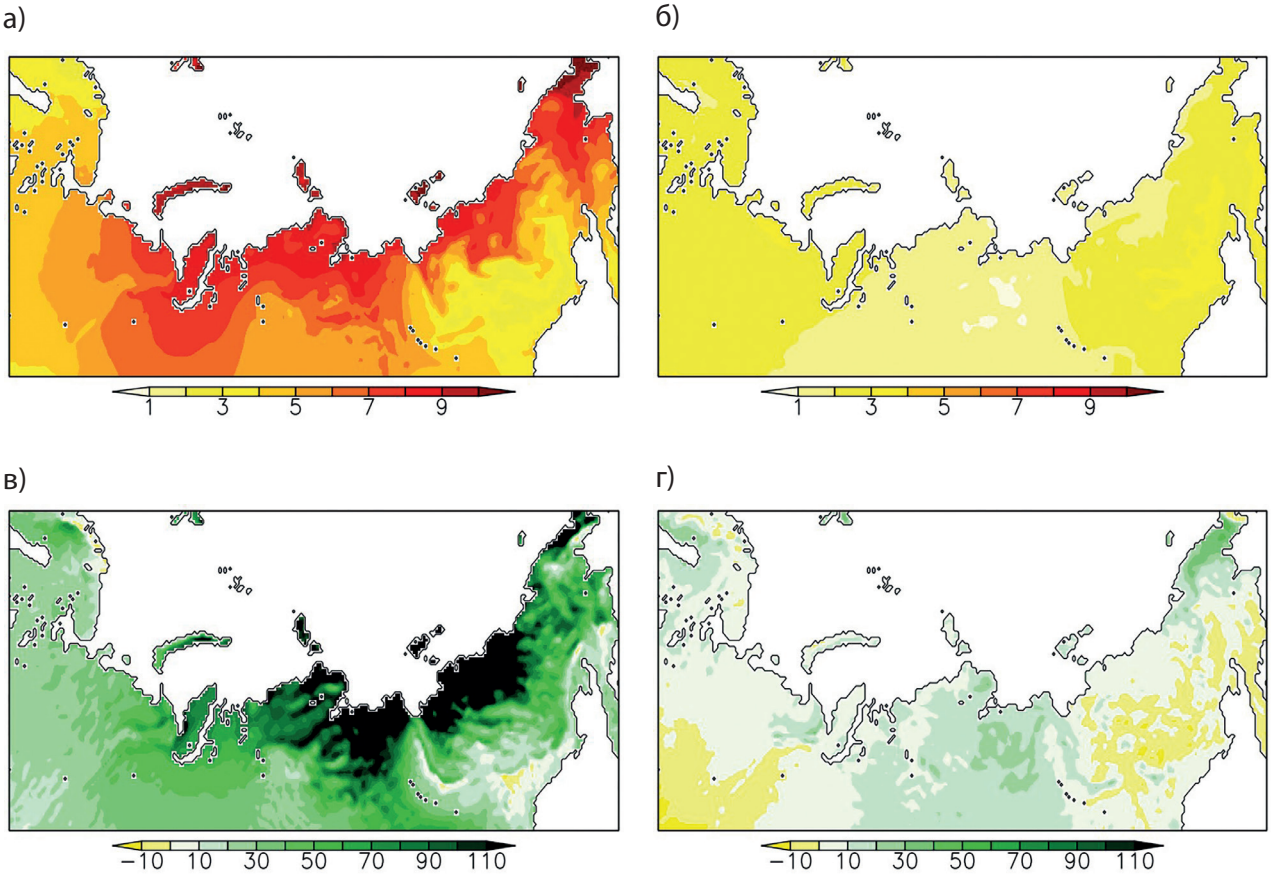



***Рис. 3.3.4*** *Изменение средней сезонной температуры воздуха (°С) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) календарных сезонов к середине XXI века (для сценария RCP8.5) по отношению к концу XX века*

*Оценки выполнены на основе регионального климатического моделирования (Shkolnik, Efimov, 2013)*

В контексте адаптации к изменениям климата для оценки рисков и оптимизации принимаемых решений на региональном уровне важно знать величину будущих изменений различных пока-

зателей не только «в среднем», но и представлять, с какой вероятностью на выбранном временном интервале можно ожидать то или иное значение рассматриваемой характеристики. Применение технологии сценарного прогнозирования регионального климата на основе массовых ансамблевых расчетов дает возможность оценить будущие изменения различных характеристик в вероятностном аспекте (Катцов и др., 2020). В практическом плане такой анализ представляет наибольший интерес для показателей экстремальности, будущие изменения которых могут существенно повлиять на надежность и безопасность проектируемых сооружений.

Согласно модельным оценкам, годовые минимумы средней суточной температуры воздуха уже к середине XXI века и в Нарьян-Маре, и в Хатанге, с вероятностью более 95% превысят их среднее значение для конца XX века (рис. 3.3.5). В то же время, особенности изменения годовых максимумов в Ненецком АО и в Таймырском районе существенно различаются. Если в Нарьян-Маре к середине XXI века максимумы могут быть меньше современной нормы с вероятностью менее 10%, то в Хатанге эта вероятность превышает 40%. Сравнение распределений изменения годовых максимумов для середины и конца XXI века показывает, что близость наиболее вероятных значений не означает тождественности распределений в целом. По мере усиления антропогенного воздействия происходит трансформация распределений, особенно заметная на их концах.

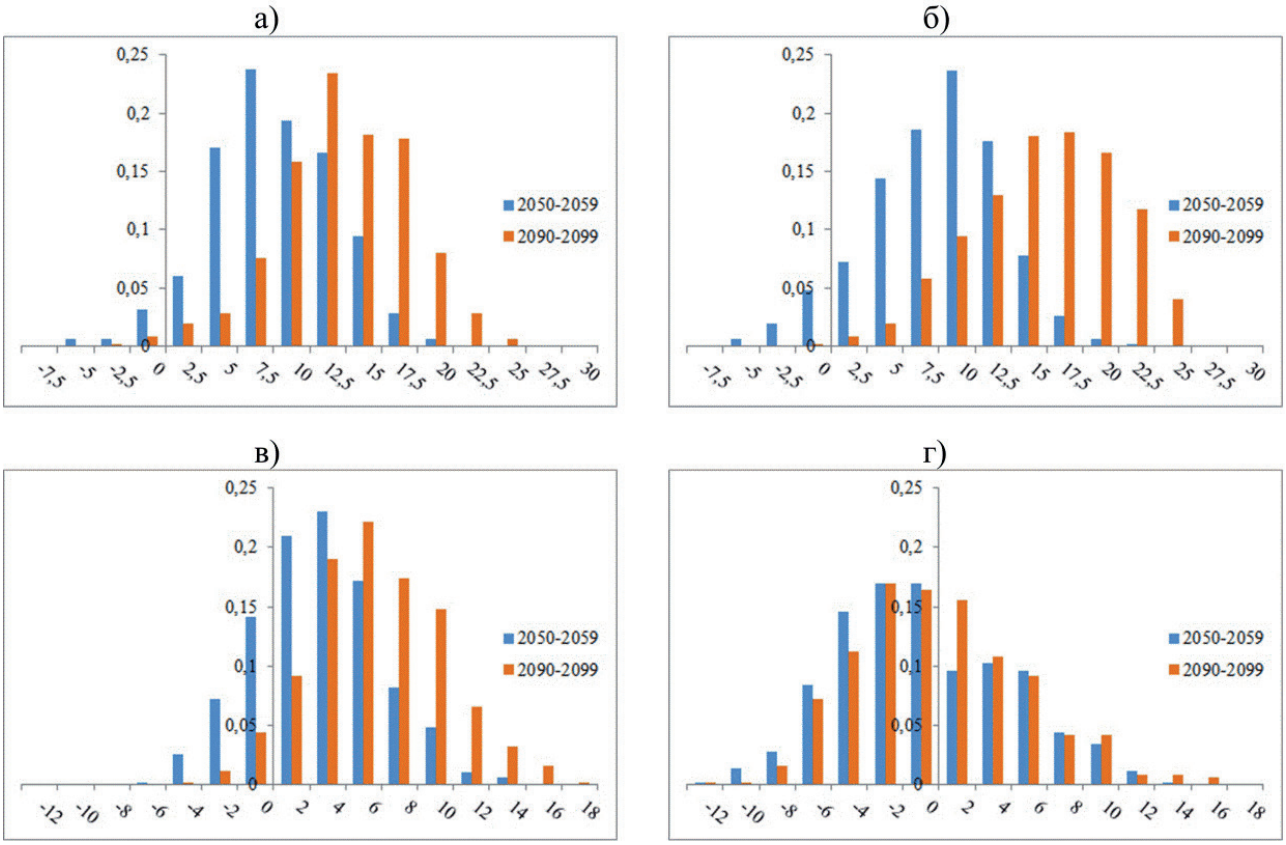



***Рис. 3.3.5*** *Вероятностные распределения годовых минимумов (а, б) и максимумов (в, г) средней суточной температуры воздуха в 2050-2059 и в 2090-2099 гг. (в отклонениях (°С) от их средних значений в 1990-1999 гг.) в различных регионах АЗРФ (а, в – Нарьян-Мар; б, г – Хатанга)*

Оценки климатических изменений наиболее важных показателей приземной температуры воздуха и режима увлажнения обсуждаются далее в контексте анализа условий жизни населения и перспективы развития ключевых региональных сегментов экономики. В отличие от главы 2.3.9, где рассматривается влияние изменений климата на морскую деятельность, в данном разделе основное внимание уделяется анализу климатических воздействий, затрагивающих материковую часть российской Арктики (Хлебникова и др., 2018).

### 3.3.2 Ожидаемые климатические воздействия на условия жизни населения АЗРФ

Несмотря на суровые климатические условия, в Арктике – как в западной ее части, так и в отдельных районах Азиатского Севера – развивается сельское хозяйство. В перспективе предполагается увеличение доли местной продукции в удовлетворении потребностей местного населения. В качестве одного из приоритетных проектов рассматривается, в частности, модернизация тепличного хозяйства для снабжения свежей овощной продукцией жителей Чукотки. Происходящие климатические изменения в теплый период года, особенно на северо-востоке АЗРФ, создадут более благоприятные возможности для развития растениеводства по сравнению с современными условиями. Для оленеводства сокращение периода с отрицательными температурами воздуха (рис. 3.3.6), увеличение числа переходов температуры через 0 °C (рис. 3.3.8), а также рост количества осадков (рис. 3.3.7), могут иметь негативные последствия, затрудняющие перемещение оленей между пастбищами, а также осложняющие добычу ими корма из-за образования на снегу ледяной корки.

Уменьшение суровости климата (Заболотник, 2010), создающее предпосылки для более комфортного проживания населения в регионе, является наиболее выраженным в Восточной Арктике (рис. 3.3.6). Значительно уменьшается число дней с экстремально низкими и опасными для здоровья человека температурами воздуха (рис. 3.3.6), растет число дней с температурой в диапазоне от –15 °C до –5 °C, который рассматривается в биоклиматологии (Энциклопедия климатических ресурсов, 2005) как наиболее благоприятный для прогулок и занятий зимними видами спорта (рис. 3.3.8). В Западной Арктике потепление в холодный период года сопровождается негативными проявлениями: возрастает число дней с переходом температуры воздуха через нулевую отметку, уменьшается число зимних дней с благоприятными для рекреации температурными условиями (рис. 3.3.8).

Рост летних экстремумов и увеличение числа дней с жаркой погодой (рис. 3.3.9) негативно отразится на экологической обстановке в промышленных районах и состоянии здоровья населения. Высокие климатические риски для населения обусловлены такими проявлениями изменения климата в регионе как усиление штормовой активности, рост интенсивности осадков, наводнения и затопления, эрозия берегов, утрата территорий (в том числе, и в результате таяния многолетней мерзлоты[1]).

Следует отметить, что в ряде регионов АЗРФ (Ямало-Ненецкий АО, север Красноярского края, Якутия, Чукотка и др.) основной контингент работающих – вахтовики. В ряде случаев их численность сопоставима с численностью коренного населения, и вахтовики практически стали его частью. Влияние климатических изменений на здоровье и условия работы вах-

[1] Вопросы влияния деградации многолетней мерзлоты на расположенную на ней инфраструктуру рассмотрены в главе 2.3.8 настоящего Доклада.

товиков во многом отличается от воздействия на жизнь постоянного населения, что предполагает и различия в необходимых адаптационных мерах.

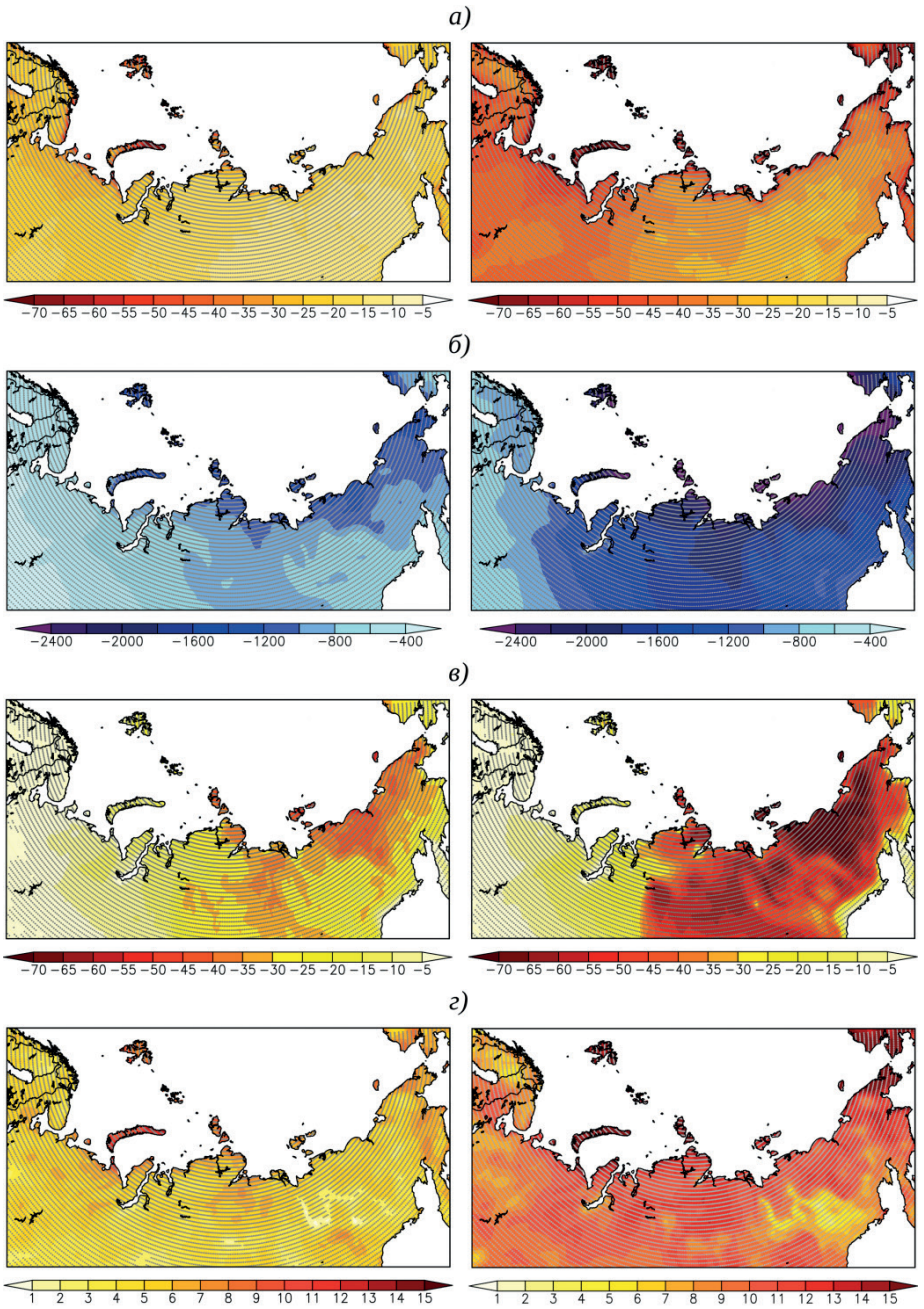



***Рис. 3.3.6*** *Изменение средних многолетних значений температурных показателей суровости климата к середине (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981-2000 гг. Оценки выполнены с помощью региональной климатической модели ГГО (Shkolnik, Efimov, 2013) по сценарию RCP8.5 в рамках международного проекта Arctic CORDEX:*

*а) продолжительность (дни) периода с отрицательной температурой воздуха;*

*б) градусо-дни с отрицательной температурой воздуха (°С•сутки);*

*в) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С;*

*г) годовой минимум средней суточной температуры воздуха (°С).*

*Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%*

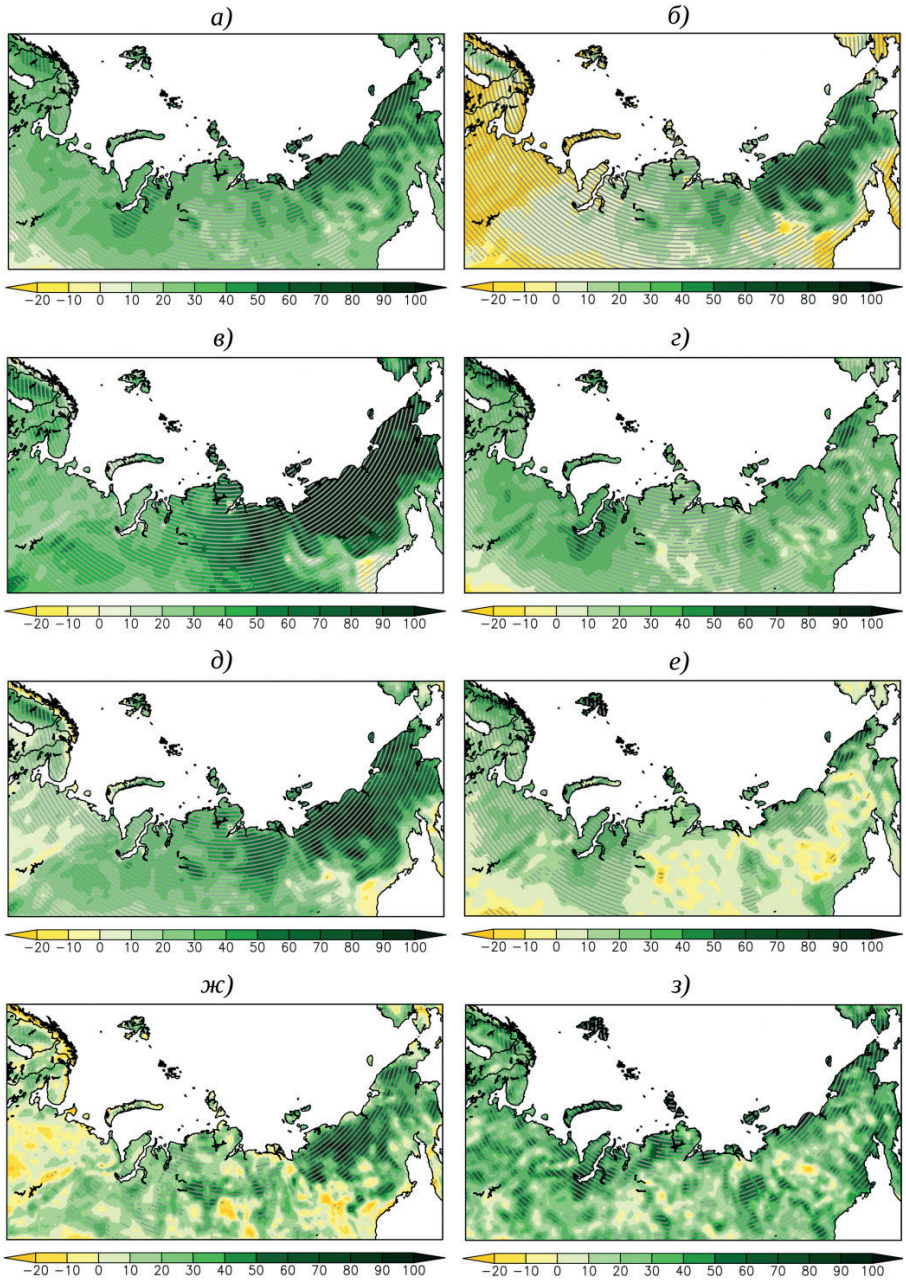



***Рис. 3.3.7*** *Изменение (%) средних многолетних значений показателей увлажнения к концу XXI века по отношению к базовым значениям за 1981-2000 гг. Оценки выполнены с помощью региональной климатической модели ГГО (Shkolnik, Efimov, 2013) по сценарию RCP8.5 в рамках международного проекта Arctic CORDEX:*

*а) годовая сумма осадков;*

*б) сумма осадков при отрицательной температуре воздуха;*

*в) сумма осадков за холодный период (ноябрь – март);*

*г) сумма осадков за теплый период (апрель – октябрь);*

*д) средняя суточная сумма осадков при отрицательной температуре воздуха;*

*е) средняя суточная сумма осадков при положительной температуре воздуха;*

*ж) максимум суточных сумм осадков при отрицательной температуре воздуха;*

*з) максимум суточных сумм осадков при положительной температуре воздуха.*

*Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%*

### 3.3.3 Ожидаемые климатические воздействия на отрасли экономики[1]

В современных условиях освоение Арктики путем эксплуатации отдельных месторождений сменилось концепцией комплексного вовлечения территорий в хозяйственный оборот в соответствии с долгосрочными национальными программами их развития. К настоящему времени сформирован обширный перечень инвестиционных проектов, запланированных к реализации на территории АЗРФ, часть из которых обладает потенциальным мультипликативным эффектом и относится к числу приоритетных. Большинство проектов направлено на решение задач добывающей и транспортной отраслей (О перечне приоритетных проектов, 2016; Гагиев и др., 2020). Эти проекты существенно различаются по степени проработанности и предполагаемым срокам реализации (от двух-трех лет до десятилетий). Многие проекты находятся на стадии анализа и обоснования различных вариантов. На этом этапе учет глобальных и региональных климатических изменений, в том числе сопряженных с опасными последствиями, которые могут произойти на протяжении XXI века., является своевременным и необходимым.

**Добывающая промышленность**

Нефтегазовый комплекс и горнодобывающая отрасль занимают основное место в структуре экономики АЗРФ. Развитие региона в ближайшие десятилетия, наряду с разработкой действующих месторождений территории, в значительной степени связывается с освоением месторождений арктического шельфа.

Климатические условия оказывают существенное воздействие на работы по разведке, добыче и транспортировке углеводородного топлива как на суше, так и на шельфе (Хлебникова, Салль, 2012). Прямое воздействие происходящих изменений термического режима в холодный сезон на протяжении XXI века является благоприятным для нефтегазового сектора. Потепление, сопровождаемое сокращением продолжительности зимнего сезона и уменьшением градусо-дней с отрицательной температурой воздуха (рис. 3.3.6а, б), создает более благоприятные условия для производства буровых работ и прокладки трубопроводных сетей. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С (рис. 3.3.6в) приведет к уменьшению простоев в работе, положительно отразится на работоспособности оборудования и эксплуатационных расходах.

Вместе с тем, происходящее потепление вызывает усиление тенденций в изменении климата, являющихся неблагоприятными с точки зрения функционирования нефтегазового сектора в регионе. Прежде всего, это относится к изменению режима увлажнения.

Потепление приводит к росту годовых сумм осадков в умеренных и высоких широтах, при этом в Арктическом регионе относительное увеличение количества осадков ожидается наибольшим (рис. 3.3.7). На территории Ямало-Ненецкого АО ожидаемое к концу XXI века увеличение составит около 40%, а на севере Якутии и Чукотского АО достигнет 70%. Рост осадков в Арктике отмечается во все календарные сезоны, но наиболее сильно проявляется в холодный период года в Азиатской части. В период

[1] Вопросы климатических воздействий на морскую деятельность в российской Арктике, включая морскую транспортную систему, освоение ресурсов арктического шельфа, освоение морских биоресурсов, рассматриваются в главе 2.3.9 настоящего Доклада.

с апреля по октябрь на большей части АЗРФ относительное увеличение количества осадков не столь значительно; максимальные значения (около 50%) достигаются на территории Ямало-Ненецкого АО.

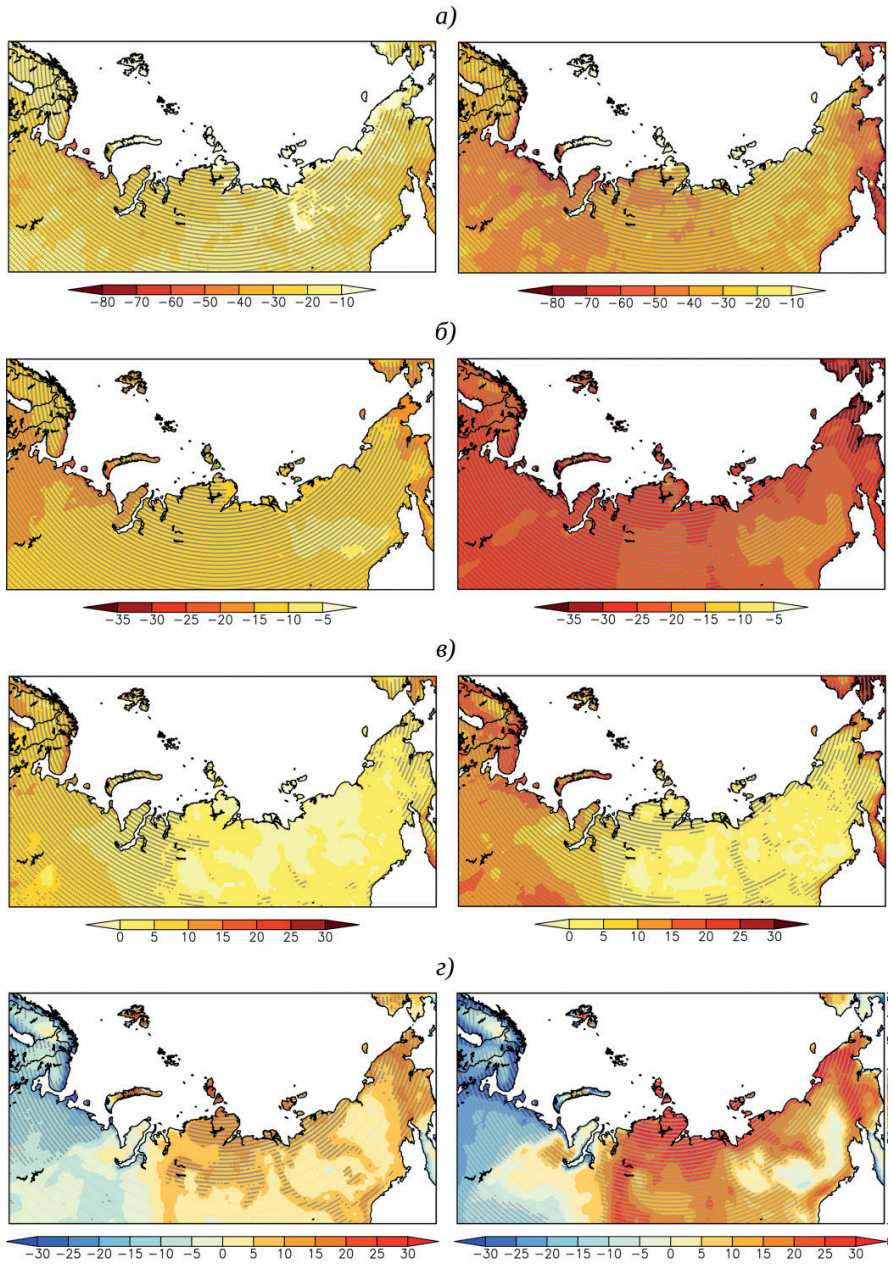



***Рис. 3.3.8*** *Изменение средних многолетних значений специализированных температурных показателей холодного периода года к середине (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981-2000 гг. Оценки выполнены с помощью региональной климатической модели ГГО (Shkolnik, Efimov, 2013) для сценария RCP8.5 в рамках международного проекта Arctic CORDEX:*

*а) продолжительность (дни) отопительного периода;*

*б) индекс потребления энергии (%) за отопительный период;*

*в) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (ноябрь – март);*

*г) число дней, благоприятных для рекреации (–15 °С < Тсут. < –5 °С).*

*Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%*

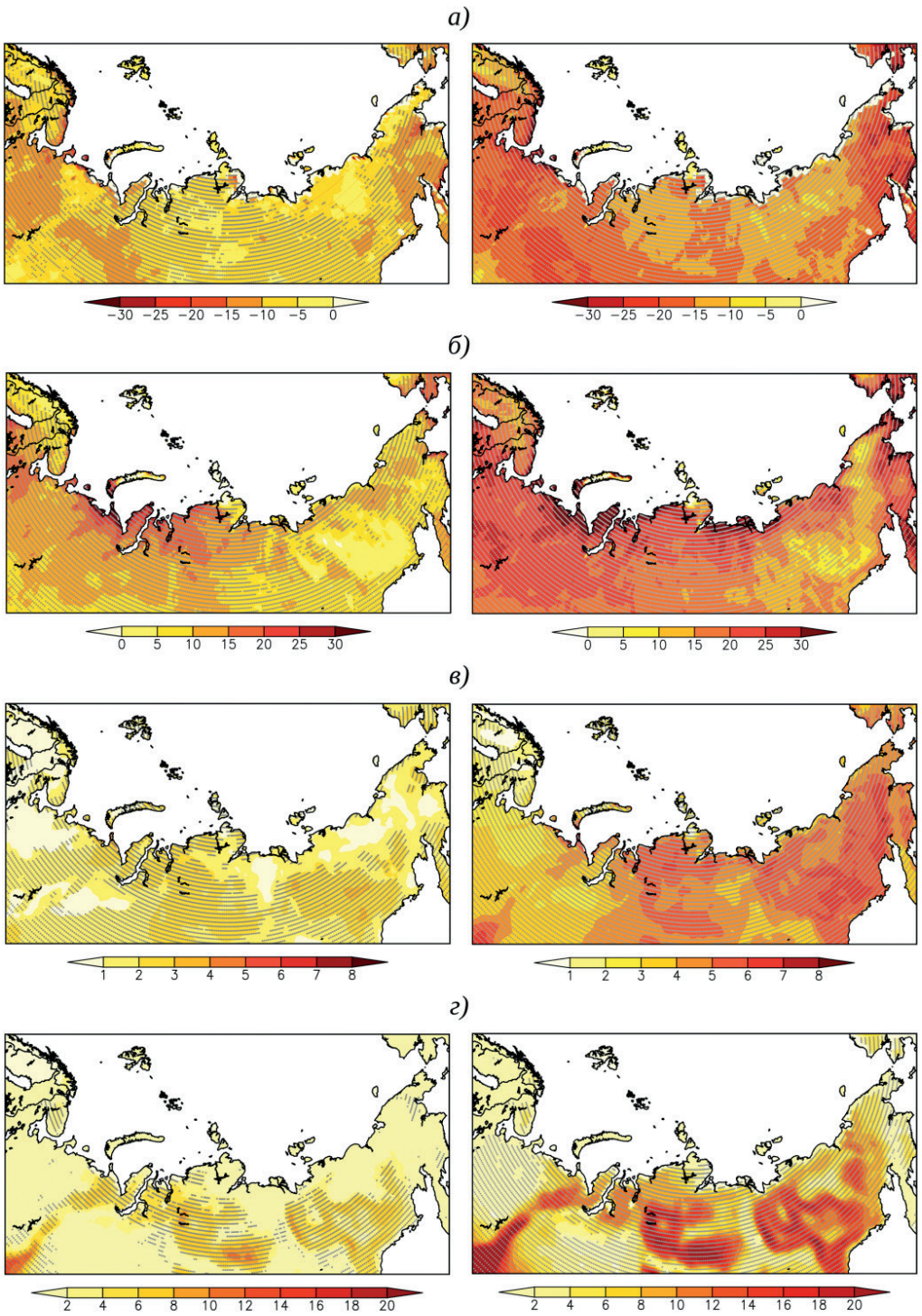



***Рис. 3.3.9*** *Изменение средних многолетних значений показателей термического режима теплого периода года к середине (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981-2000 гг. Оценки выполнены с помощью региональной климатической модели ГГО (Shkolnik, Efimov, 2013) для сценария RCP8.5 в рамках международного проекта Arctic CORDEX:*

*а) дата устойчивого весеннего перехода через +5 °С (дни);*

*б) дата устойчивого осеннего перехода через +5 °С (дни);*

*в) годовой максимум средней суточной температуры воздуха (°С);*

*г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +25 °С.*

*Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%*

На всей территории АЗРФ отмечается выраженный рост суточной интенсивности осадков при отрицательной температуре воздуха (рис. 3.3.7). В отличие от Европейского Севера на Азиатской территории АЗРФ также ожидается рост суммы осадков, выпадающих при отрицательной температуре воздуха, и, соответственно, увеличение снегонакопления (рис. 3.3.7).

Увеличение интенсивности зимних осадков (рис. 3.3.7) окажет отрицательное воздействие на сооружения нефтегазодобычи и машинное оборудование, особенно при работах на шельфе. Возможное усиление ветро-волновой активности также негативно отразится на эксплуатации морских платформ. С учетом увеличения высоты штормовых нагонов и интенсификации абразионных процессов, приводящих к размыву берегов, а также высоких экологических рисков, может возникнуть необходимость ужесточения требований к безопасности при проектировании объектов нефтедобычи.

Опасные последствия изменений климата для нефтегазовой отрасли в АЗРФ связаны с деградацией многолетней мерзлоты. На фоне глобального потепления значительную роль в деградации играют техногенные составляющие регионального и локального масштабов. Оценки, основанные на использовании региональной климатической модели (Shkolnik, Efimov, 2013) с добавлением мезомасштабных блоков атмосферного пограничного слоя и теплопереноса в грунтах (Пикалева и др., 2016), позволяют детализировать пространственные распределения скорости деградации многолетней мерзлоты, полученные по ансамблю глобальных моделей.

**Система энергоснабжения**

АЗРФ характеризуется широким разнообразием используемых схем и источников энергии, отражающим различия в уровне социально-экономического развития арктических территорий. Значительная продолжительность отопительного периода, приближающаяся в некоторых районах к круглогодичной, и крайне низкая средняя температура зимнего сезона, определяют преимущественно теплофикационный режим работы электростанций и преобладание ТЭЦ. Неразвитость сетевого комплекса и технологически устаревшее оборудование являются основными проблемами существующей системы энергоснабжения в регионе (Воронина и др., 2017).

В рамках запланированных приоритетных проектов предполагается строительство топливно-энергетического комплекса на Таймыре, а также модернизация системы теплоснабжения в г. Воркута. Учет динамики изменений климата будет способствовать повышению надежности систем теплоснабжения и оптимизации их работы.

Происходящие изменения климата уже к настоящему времени привели к существенному сокращению продолжительности отопительного периода, наиболее заметному в Западной Арктике (Хлебникова, Салль, 2013). Согласно модельным оценкам, в ближайшие десятилетия эта тенденция сохранится. На северо-востоке Европейского Севера ожидаемое уменьшение продолжительности отопительного периода составит 40-50 дней к середине и до 60-70 дней к концу XXI века. На территории Азиатского Севера более быстрыми темпами будет расти средняя температура отопительного

периода, при этом максимальные изменения ожидаются на севере Таймыра. Совокупное влияние двух факторов: сокращения продолжительности и увеличения средней температуры отопительного периода – должно привести к значительному уменьшению дефицита тепла за отопительный период, величина которого может рассматриваться как индекс потребления энергии (Хлебникова, Салль, 2013). Это уменьшение будет наиболее выраженным на Азиатском Севере – в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями (рис. 3.3.8). К концу XXI века на Чукотском полуострове ожидается уменьшение дефицита тепла на 3000 °С•сут. и более. Относительное уменьшение будет наибольшим в Западной Арктике (до 30% к концу XXI века). Однако для полноценного извлечения выгод, связанных с потеплением, требуется широкое внедрение современных технологий производства энергии в сочетании с комплексной модернизацией системы теплоснабжения и тепловых сетей.

**Наземная транспортная инфраструктура**

Учет региональных изменений климатического воздействия на объекты наземной инфраструктуры особенно актуален при реализации крупных проектов по развитию транспортной сети в регионе. Среди приоритетных проектов в сфере развития транспортной инфраструктуры в Арктике можно выделить «Северный широтный ход» – строительство железнодорожной магистрали (включая мост через реку Обь), которая свяжет действующие участки Северной и Свердловской железных дорог. Одновременно предполагается существенное развитие автомобильной сети; планируется строительство объектов аэродромной инфраструктуры (Норильск, Нарьян-Мар, Тикси) (О перечне приоритетных проектов, 2016).

Климатические характеристики лежат в основе принимаемых решений по выбору типов применяемых конструкций и материалов, технологии работ и организации строительства (Свод правил СП20.13330.2011, 2011; Свод правил СП131.13330.2012, 2012). Происходящие изменения термического режима являются благоприятными с точки зрения производства работ. Растет число дней с температурой воздуха ниже –30 °С, приемлемых для работ на открытом воздухе (рис. 3.3.6). Уменьшается период с отрицательными значениями температуры воздуха (рис. 3.3.6), когда невозможно выполнение отдельных строительных работ («мокрых работ»).

С точки зрения надежности существующих и проектируемых сооружений важной является адекватная оценка изменений характеристик экстремальности термического режима. В условиях российской Арктики низкие и высокие температуры воздуха, а в особенности – большие перепады температуры (в течение года или в течение суток) приводят к возникновению повышенных температурных деформаций и напряжений, которые ухудшают прочностные характеристики элементов сооружений и снижают их несущую способность. Потепление в зимний период года приводит к повышению годовых минимумов температуры воздуха (рис. 3.3.6). Это увеличение сравнительно невелико в Западной Арктике и весьма значительно в восточных регионах (до 10-15 °С к концу века). Региональный анализ изменения годовых максимумов средней суточной температуры воздуха (рис. 3.3.9) показывает, что их наиболее выраженный рост ожидается также в Восточной Арктике. В среднем минимумы меняются быстрее, чем максимумы. Однако, учитывая сложную структуру временной изменчивости экстремумов в Арктике, вывод об уменьшении температурных нагрузок на сооружения в регионе представляется преж-

девременным. В ряде работ (Хлебникова, Дацюк, 2014; Хлебникова и др., 2012), отмечалось, что в Азиатской части территории России выявляются области, где потепление может сопровождаться увеличением отклонений экстремально-высоких температур от средних значений и усилением температурных воздействий (нагрузок) на сооружения. Полученные на сегодняшний день результаты свидетельствуют об актуальности дальнейшего исследования вопроса о температурных воздействиях в условиях изменения климата с применением ансамблевого подхода и привлечением статистических методов интерпретации (Катцов и др., 2017б; 2020).

Важное проявление температурных воздействий на сооружения связано с частыми переходами температуры воздуха через 0 °С. Такие переходы, наряду с большими перепадами температуры воздуха, приводят к ускоренному старению материалов, из которых сделаны сооружения (дороги, мосты, тоннели, взлетно-посадочные полосы аэродромов, здания и др.) и как результат – к снижению срока их службы. На протяжении XXI века этот отрицательный эффект потепления будет в наибольшей степени проявляться на Европейской территории и, в частности, в Западной Арктике (рис. 3.3.8).
Существенным негативным фактором, воздействующим на транспортную инфраструктуру, является рост количества и интенсивности осадков (рис. 3.3.7). Особенно высокие риски связаны с увеличением экстремальных суточных сумм осадков в теплый сезон, которые приводят к потере устойчивости склонов, возникновению оползней и разрушению объектов.

**Портовая инфраструктура**

Стратегия развития Северного морского пути и его использования для перевозки грузов из Европы и России в страны Тихоокеанского региона требует создания соответствующей портовой инфраструктуры, отвечающей современным требованиям климатической безопасности и обеспечивающей эффективное функционирование транспортного коридора. В рамках приоритетных проектов этого направления предполагается осуществить комплексное развитие Мурманского транспортного узла, расширение возможностей порта Сабетта на Ямале, реконструкцию портов в Архангельске, в п. Индига, Тикси, Певек.

Морские порты в большой степени подвержены рискам, связанным с изменениями климата. Наряду с глобальными рисками, обусловленными повышением уровня Мирового океана, при модернизации существующих и строительстве новых портов необходимо учитывать и региональные климатические изменения прямых атмосферных воздействий.

Потепление климата приведет к значительному увеличению продолжительности теплого периода года (рис. 3.3.6), что улучшит условия эксплуатации портовой инфраструктуры (за счет меньшей частоты возникновения условий обледенения), а также уменьшит затраты на обработку и хранение грузов. Вместе с тем, высокие летние температуры, число дней с которыми будет возрастать (рис. 3.3.9), оказывают прямое негативное воздействие на функционирование портов. В таких условиях увеличивается нагрузка на чувствительное к температуре оборудование, изготовленное из металла; растут энергозатраты на хранение грузов.

Сильный дождь является фактором риска для электрооборудования портовых кранов, причем в случае возникновения аварийных ситуаций ущерб может быть очень значительным.

Ожидаемое усиление конвективных процессов, рост интенсивности летних осадков (рис. 3.3.7) и продолжительности гроз приведут к увеличению простоев портовых кранов.

Особо следует упомянуть об уязвимости портовых объектов в Арктике под воздействием деградации многолетней мерзлоты. В работах, выполненных на основе системы моделей разного разрешения (Пикалева и др., 2016), обращается внимание на более сильное протаивание песчаных грунтов, характерных для русел рек на севере Западной Сибири и на Ямале. Важно также отметить возрастание рисков разрушения портовой инфраструктуры, связанных с усилением штормо-волновой активности в арктических морях.

**Лесопромышленный комплекс**

АЗРФ обладает многими видами ресурсов международного значения. К ним относятся и лесные ресурсы, основная часть которых находится в Архангельской области. Лесозаготовка и обработка древесины занимают важное место в экономике области, и дальнейшее развитие этого направления является приоритетной задачей.

Воздействие изменений климата на древесную растительность в Западной Арктике не является однозначным. Наряду с позитивными факторами (уменьшение суровости зимних условий (рис. 3.3.6), увеличение продолжительности вегетационного сезона (рис. 3.3.9)), определенные региональные особенности потепления оказывают негативное влияние на лесные сообщества[1]. Следует отметить не только увеличение вклада экстремально-высоких летних температур и связанные с этим риски возникновения лесных пожаров, но и растущее число оттепелей в холодный период года. Рост интенсивности осадков в сочетании с увеличением доли жидких осадков в зимний сезон приводит к такими негативными явлениями как снеголом, снеговал и др., которые ухудшают состояние лесов, а также провоцирует массовое размножение вредителей и распространение болезней леса (Замолодчиков, Краев, 2016; Сурина, Сеньков, 2017).

## 3.3.4 Адаптация населения и экономики к изменениям климата в российской Арктике

Повышенная интенсивность наблюдаемых и ожидаемых в XXI веке изменений климата в российской Арктике обостряет актуальность разработки и реализации эффективных стратегий и программ адаптации к изменениям климата как на государственном уровне (федеральными и региональными органами власти), так и ведущими отечественными компаниями, осуществляющими хозяйственную деятельность в Арктике. Разработка таких стратегий требует системного подхода, внедрения широкого набора технологических, организационно-управленческих и институциональных инноваций (см., например, AMAP, 2017a, б, в).

В общем виде адаптация к изменениям климата необходима для снижения потерь и использования выгод, связанных с наблюдаемыми и будущими изменениями климата (Климатическая доктрина Российской Федерации, 2009). В арктическом макрорегионе адаптация к изменениям климата предусматривает обеспечение

[1] Подробнее см. главу 2.1.1 настоящего Доклада.

безопасности населения и экосистем, устойчивости функционирования инфраструктуры и хозяйственных комплексов – в отношении негативных последствий изменений климата в Арктике, а также максимальное использование потенциала хозяйственного освоения арктических территорий, обеспечиваемого положительным влиянием изменений климата.

В последние годы вопросам адаптации к изменениям климата уделяется повышенное внимание в рамках государственной политики на федеральном и региональном уровнях. Адаптация экономики и инфраструктуры к изменениям климата закреплена в качестве одной из задач «Стратегии развития АЗРФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (2020). Принят «Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата до 2022 года» (2019), которым предусмотрена разработка отраслевых и региональных планов адаптации, включая разработку плана адаптации к изменениям климата в АЗРФ.

Ключевые элементы адаптации населения и хозяйственных систем АЗРФ к изменениям климата должны включать следующее (Порфирьев, Терентьев, 2016):

– защита населения от негативных последствий изменений климата (совершенствование системы здравоохранения, помощь при чрезвычайных ситуациях, разработка систем раннего оповещения о стихийных бедствиях и погодно-климатических аномалиях и другие меры по улучшению систем жизнеобеспечения и повышения качества жизни с учетом меняющихся, в том числе под влиянием изменений климата, условий);
– мониторинг и прогнозирование изменений погодно-климатических условий в АЗРФ, включая стихийные бедствия и погодно-климатические аномалии;
– оценка рисков и определение приоритетов (ранжирование) рисков изменений погодно-климатических условий для населения и хозяйственных комплексов АЗРФ в отраслевом и территориальном (пространственном) разрезах;
– разработка и реализация отраслевых программ адаптации, направленных на защиту и повышение устойчивости хозяйственных комплексов АЗРФ к реальным (актуальным) неблагоприятным последствиям изменений климата (протаиванию многолетних мерзлых грунтов, абразии берегов, учащению лесных пожаров и т.д.);
– разработка и реализация отраслевых программ адаптации, направленных на
(а) снижение ожидаемого ущерба хозяйственных комплексов от прогнозируемых климатических изменений, включая меры по минимизации ущерба природной среде и экосистемам, связанным с интенсификацией хозяйственной деятельности в АЗРФ с учетом тенденций смягчения климата, открытия доступа к новым месторождениям полезных ископаемых, более интенсивной эксплуатации Северного морского пути и других транспортных маршрутов;
(б) эффективное использование указанными комплексами благоприятных возможностей, открывающихся в результате смягчения климата;
– разработка и реализация региональных программ адаптации, направленных на обеспечение защиты населения, инфраструктуры и природных экосистем от последствий изменений климата (наводнений, пожаров и других стихийных бедствий, волн тепла и холода; протаивания многолетних мерзлых грунтов, абразии береговых зон и т.д.);

– разработка и реализация образовательных и научных программ, обеспечивающих развитие базы данных и базы знаний в области географии, экологии, климата и социально-экономических процессов в АЗРФ с целью, в частности, повышения качества прогнозирования, оценки рисков и эффективности адаптационных мер в рамках стратегического планирования развития Арктического макрорегиона.

При этом конкретное содержание системы адаптационных мер существенно зависит от особенностей природно-климатических условий, социально-экономического положения и ресурсной обеспеченности конкретных территорий АЗРФ.

**Защита населения и территорий российской Арктики в рамках адаптации к изменениям климата**

Климатические изменения и их экологические последствия оказывают влияние на здоровье жителей арктических городов и на коренное население АЗРФ (Ревич, Терентьев, 2015). Они становятся причиной дополнительной смертности (в результате волн тепла и холода); повышения заболеваемости инфекционными болезнями (как по причине изменений ареалов обитания возбудителей инфекций, так и, например, в результате инфицирования воды из-за повреждения водопроводно-канализационных и других санитарно-технических сооружений). Климатические изменения оказывают негативное влияние на состояние здоровья и комфортность жизни коренных малочисленных народов Севера по причинам ухудшения условий охоты и рыбного промысла, роста числа травм, например, из-за более раннего вскрытия морского льда. Кроме того, климатические изменения, наряду с непосредственным влиянием, усиливают кумулятивный эффект ряда прочих (в том числе антропогенных) негативных воздействий, особенно, загрязнения воздуха в арктических городах (см. главу 2.2.3).

Меры защиты населения и территорий российской Арктики к изменениям климата включают:

(1) совершенствование систем и инструментов оказания помощи людям, пострадавшим от стихийных бедствий, вызванных климатическими изменениями;

(2) развитие систем раннего предупреждения населения об ожидаемых стихийных бедствиях и погодно-климатических аномалиях и проведение просветительской работы по безопасному поведению людей в условиях таких чрезвычайных ситуаций;

(3) развитие системы здравоохранения, направленное на усиление эпидемиологического надзора, а также на повышение качества и своевременности диагностики и лечения заболеваний, прямо или косвенно обусловленных изменениями климата (инфекционных заболеваний, тепловых ударов и т.д.);

(4) программы совершенствования трудового законодательства и стандартов в области охраны труда с целью повышения обеспеченности населения системами кондиционирования и другими средствами, улучшающими комфортность труда в условиях экстремальных температурных режимов (в том числе, волн тепла и холода).

Особое значение имеет система адаптационных мероприятий в сфере здравоохранения. Она предусматривает организационно-управленческие, технологические, образовательные и иные мероприятия. Стратегия адаптации в сфере здравоохранения (в первую очередь, в рамках компетенции Минздрава России) должна включать

следующие группы мероприятий (Ревич и др., 2019; Стратегия адаптации, 2012).

1. Подготовка системы здравоохранения к возможным изменениям географического распространения инфекционных заболеваний, к появлению новых, нетипичных для региона инфекций предусматривает: увеличение численности специально подготовленного персонала; увеличение пропускной способности лечебных учреждений; изменение (без ущерба для населения) графика работы лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) в период аномальных колебаний температуры; укрепление первичного звена здравоохранения, в том числе улучшение материальной и методической базы учреждений здравоохранения, особенно в сельской местности (межрайонные центры, фельдшерско-акушерские пункты, амбулатории, участковые больницы); обеспечение комфортного микроклимата в помещениях медицинских учреждений (в том числе кондиционирование больниц, роддомов).

2. Разработка порядка оказания медицинской помощи и клинических рекомендаций по диагностике и лечению климатозависимых инфекций предусматривает, в частности, внедрение методов ранней диагностики инфекционных заболеваний в ЛПУ; создание в каждом регионе достаточного запаса вакцин, сывороток, препаратов компонентов крови для своевременного оказания надлежащей медицинской помощи пациентам.

3. Разработка положений экологической медицины, направленных на профилактику негативных последствий изменений климата в сфере инфекционной патологии человека, а также создание на арктических территориях профилактических экологических клиник.

4. Усиление/совершенствование постдипломного образования медицинских работников и подготовки парамедиков предусматривает разработку соответствующих методических рекомендаций, проведение циклов тематического усовершенствования по эпидемиологии, ранней диагностике природно-очаговых инфекций, терапии, неспецифической и специфической профилактике климатозависимых инфекционных заболеваний.

5. Мероприятия по санитарному просвещению населения, включая социальную рекламу, использование СМИ, интернет-ресурсов по проблемам здоровья, связанным с изменениями климата, и профилактике отрицательных воздействий изменений климата, в том числе рискам аномальных погодных условий (волн тепла и холода, стихийных бедствий) и рекомендациям по оптимальному поведению в таких условиях; более качественное информирование населения об ожидаемых температурных аномалиях, в том числе с использованием телеканалов и радиоканалов; совершенствование системы сбора и регистрации информации о состоянии здоровья населения, включая основные и новые факторы риска, возникающие в связи с изменениями климата.

Важную роль в обеспечении защиты населения от климатически обусловленных угроз играет развитие систем мониторинга состояния окружающей среды. Данное направление предусматривает, в частности, модернизацию системы мониторинга и прогноза возникновения и динамики развития опасных геофизических, геологических, метеорологических, гидрологических, экологических и социально-экономических явлений и процессов; расширение охвата и модернизацию системы оповещения и информирования населения и хозяйствующих субъектов на аркти-

ческих территориях о чрезвычайных ситуациях, используя для этого современные информационные технологии и средства связи; создание баз хранения аварийно-спасательной (пожарной) техники и средств в ключевых населенных пунктах на территории АЗРФ для повышения оперативности проведения аварийно-спасательных операций (Порфирьев, 2017, с. 243-244).

Отдельным важным направлением стратегии адаптации к изменениям климата в российской Арктике является обеспечение защиты территорий и долгосрочной устойчивости экосистем, которые испытывают повышенную уязвимость к нарастающим процессам изменений климата. Адаптационные мероприятия в рамках данного направления включают, во-первых, меры по защите поселений (жилого фонда и коммунальной инфраструктуры), предусматривающие регулярный мониторинг состояния объектов и условий окружающей среды (например, темпов протаивания многолетних мерзлых грунтов) для оценки рисков их повреждений и принятия мер по укреплению фундаментов зданий. Особое внимание следует уделять поселениям вблизи береговой зоны, подверженным повышенным рискам из-за абразии. Во-вторых, меры по защите инфраструктуры, предусматривающие регулярный мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры (железнодорожных и автомобильных дорог), коммунальных сетей, трубопроводов и т.д. с целью недопущения ущербов (особенно крупных) от техногенных аварий, вызванных выходом данных объектов из строя. Адаптационные меры, включая инвестиции, по сохранению уникальных природных экосистем и биологического разнообразия Арктики должны быть сосредоточены на недопущении (минимизации ущербов) от лесных пожаров, антропогенного загрязнения окружающей среды и экосистем АЗРФ, усиленных изменениями климата.

Кроме того, необходимы развитие и модернизация поисково-спасательных сил и средств с целью повышения эффективности реагирования на погодно-климатические аномалии и чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера, обусловленные климатическими факторами. В числе прочего целесообразно создание единой Арктической аварийно-спасательной службы МЧС России, что позволит сформировать единые органы управления, системы связи и оповещения о чрезвычайных ситуациях, а также единые оперативно-технические требования по созданию систем и средств для решения задач комплексной безопасности в российской Арктике, в том числе системы спасения на море в условиях интенсификации хозяйственного использования Северного морского пути (Порфирьев, 2017, с. 251).

### Адаптация экономики и хозяйственных комплексов российской Арктики к последствиям изменений климата

Масштаб изменений климата в российской Арктике делает необходимым учет климатического фактора и формирование соответствующих адаптационных программ при разработке стратегий социально-экономического развития арктических регионов, а также отраслевых стратегий развития в Арктике.

Одним из основных направлений адаптации экономики и хозяйственных комплексов в российской Арктике являются меры по минимизации ущербов от протаивания многолетнемерзлых грунтов. Для адаптации строительного комплекса с учетом ожидаемых дополнительных ущербов, вызванных снижением несущей способности грунтов и их проседанием, необходимы существенное наращи-

вание объемов строительства для замещения поврежденных зданий и сооружений, а также техническая модернизация, включающая разработку конструкционных материалов и других технологических решений возведения жилых зданий и объектов социальной, коммунальной, энергетической, производственной инфраструктуры, снижающих их уязвимость к процессам протаивания многолетнемерзлых грунтов (Порфирьев и др., 2021).

С целью обеспечения долговечности зданий и сооружений при возведении новых объектов целесообразно использование инновационных конструкционных материалов с повышенными прочностными характеристиками, минимизирующих повреждение зданий и сооружений в условиях протаивания многолетнемерзлых грунтов и других изменений климата (Порфирьев, Хлебникова, 2015). В настоящее время большая часть выпускаемой отечественной промышленностью продукции официально относится к категориям У (умеренный климат) или УХЛ (умеренно-холодный климат, нижний температурный предел –40 °С), тогда как северные нормативы, несмотря на тенденцию потепления климата, требуют соблюдения температурного предела до –60 °С. Кроме того, строительные стандарты и сами конструкционные материалы должны быть рассчитаны на большее число циклов замораживания и оттаивания, повышенную коррозийную устойчивость различных элементов, обеспечивать уменьшение возможности промачивания стен (соответствующие стыки панельных зданий, ориентация здания, козырьки над входами и др.) (Катцов и др., 2011, с. 147).

Целесообразно ужесточение нормативов теплозащитных свойств зданий, учитывающих при проектировании расчетные параметры температуры воздуха, соответствующие более высокому уровню теплообеспеченности и предполагающие использование современных систем автоматического регулирования подачи тепла (Хлебникова и др., 2014, с. 130-131), а также энергоэффективности. Особое значение имеет также обновление норм строительного проектирования, которые учитывают нестационарность и усиливающуюся экстремальность климатического режима в Арктике, в частности, возрастание ветровых и снеговых нагрузок (Стандарт организации, 2008).

В нефтедобывающем секторе меры адаптации к изменениям климата направлены на обеспечение работоспособности сооружений и минимизации рисков техногенных аварий. Конкретные меры включают: усиление фундаментов при неизменном весе конструкций с помощью увеличения длины и, при необходимости, числа свай, погружаемых в многолетнемерзлые грунты; термостабилизация (поддержание в мерзлом состоянии) грунта с использованием специальных технических средств (сезонных охлаждающих устройств, вертикальных естественно-действующих трубчатых систем), применение инновационных материалов с повышенными прочностными свойствами.

В рамах адаптации транспортной инфраструктуры к изменениям климата необходима реализация таких мер, как мониторинг, прогнозирование и раннее оповещение о гололедных отложениях на дорогах; принятие технических решений по снижению рисков процессов протаивания многолетнемерзлых грунтов для качества и устойчивости работы автомобильных и железнодорожных магистралей, учет воздействия колебаний температурно-влажностных, ветровых и других погодно-климатических характеристик на физическое состояние дорог и транспортных средств (Катцов и др., 2011,

с. 151). Кроме того, с учетом ожидаемой, вследствие изменений климата, интенсификации хозяйственной деятельности на арктических территориях необходимы наращивание строительства новых транспортных магистралей и инженерных сооружений и улучшение качества уже существующих магистралей, что позволит повысить их пропускную способность и снизить риски экономических потерь (например, увеличения времени доставки грузов, а также расстояния транспортировки в случае объезда реконструируемых участков и т.п.) из-за протаивания многолетней мерзлоты и других экстремальных погодных воздействий.

Одним из ключевых направлений адаптации экономики российской Арктики к изменениям климата является система мер по развитию судоходства и роста грузопотоков по Северному морскому пути, включающая активное строительство ледокольного флота судов-контейнеровозов повышенного ледового класса (Елисеев, Наумова, 2021), строительство новой портовой инфраструктуры. При этом важное значение имеют задачи повышения защищенности портовой инфраструктуры к возрастающим штормовым нагрузкам и процессам абразии береговой зоны, мониторинга ледовой обстановки, соответствующих систем предупреждения и раннего оповещения.

В лесном комплексе приоритетными задачами адаптации к изменениям климата являются минимизация частоты и интенсивности лесных пожаров и вызванного ими финансового и экологического ущерба, что обеспечивается, в частности, за счет внедрения высокотехнологичных средств мониторинга (в том числе спутникового) лесных пожаров; профилактика и борьба с вредителями и возбудителями болезней леса, негативное воздействие которых нарастает в результате изменений климата, развитие технологий и организационных мер лесоразведения и лесовосстановления и т.д. (Писаренко, Страхов, 2017) Указанные направления адаптации должны реализовываться в рамках комплексной государственной программы развития лесного хозяйства.

При формировании государственных и корпоративных стратегий адаптации в российской Арктике следует учитывать их долгосрочный потенциал по повышению безопасности, качества жизни населения, перехода российской экономики и общества к устойчивому развитию. К числу таких позитивных эффектов можно отнести:

1) развитие фундаментальной науки и прикладных НИОКР, направленное на углубление знаний о географии, экологии, климате и социально-экономических процессах в российской Арктике;
2) качественные улучшения в эффективности природопользования, особенно лесов; а также добыча природных и биоресурсов при минимизации ущерба для сухопутных, морских и речных экосистем региона;
3) переход к новым, более высоким, стандартам комфортности проживания и качества жизни населения АЗРФ за счет модернизации и диверсификации энергетической, транспортной и коммунальной инфраструктуры макрорегиона, особенно в крупных городах;
4) переход к новому качеству национальной политики (на федеральном и региональном уровнях), направленной на обеспечение защиты и повышения качества жизни коренных малочисленных народов Севера;
5) освоение ведущими российскими компаниями технологических и управленческих компетенций мирового уровня в области экологических инноваций, стратегий кор-

поративной социальной ответственности за счет интеграции адаптационных механизмов в свои стратегии развития, в первую очередь, добычи и переработки природных ресурсов и ископаемого топлива, что, в конечном счете, будет способствовать повышению конкурентоспособности и самообеспеченности национальной экономики и качества жизни населения России (Порфирьев, Терентьев, 2016).

## Список литературы


**Бакланов П. Я., Мошков А. В., Романов М. Т., 2015:** Географические и геополитические факторы и направления долгосрочного развития Арктической зоны России // Вестник ДВО РАН. – № 2. – С. 5-15.

**Воронина С. А., Порфирьев Б. Н., Семикашев В. В., Терентьев Н. Е., Елисеев Д. О., Наумова Ю. В., 2017:** Последствия изменений климата для экономического роста и развития отдельных секторов экономики российской Арктики // Арктика: экология и экономика. – № 4 (28). – С. 4-17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-4-17.

**Гагиев Н. Н., Гончаренко Л. П., Сыбачин С. А., Шестакова А. А., 2020:** Национальные проекты в Арктической зоне Российской Федерации – Арктика и Север, 2020. – № 41. – С. 113-129. DOI 10.37482/issn2221-2698.2020.41.113.

**Елисеев А. В., Семенов В. А., 2016:** Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // Доклады Академии Наук. – Т. 471, № 2. – С. 214-218.

**Елисеев Д. О., Наумова Ю. В., 2021:** Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений // Проблемы прогнозирования. – № 2. – С. 63-74.

**Заболотник С. И., 2010:** Суровость климатических условий на территории России // География и природные ресурсы. – № 3. – С. 69-74.

**Замолодчиков Д. Г., Краев Г. Н., 2016:** Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. – № 4 (48). – С. 23-31.

**Катцов В. М., Киселев А. А., Мелешко В. П., Павлова Т. В., 2017а:** Глобальные изменения климата и основные сценарии и особенности изменений климата в Арктике: модели, оценки, прогнозы /. В кн. «Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата» / под ред. акад. Б. Н. Порфирьева – М., Научный консультант. – С. 17-52.

**Катцов В. М., Кобышева Н. В., Мелешко В. П., Порфирьев Б. Н., Ревич Б. А., Сиротенко О. Д., Стадник В. В., Хлебникова Е. И., Чичерин С. С., Шалыгин А. Л., 2011:** Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Катцов В. М. и Порфирьев Б. Н., ред., – М.: Росгидромет. – 251 с.

**Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2012:** Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. – № 2 (6). – С. 66-79.

**Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2017:** Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды ГГО. – Вып. 586. – С. 7-20.

**Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л., 2020:** Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – № 5. – С. 46-58.

**Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В., 2017б:** Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах // Метеорология и гидрология. – № 7. – С. 68-80.

**Кибанова О. В., Елисеев А. В., Мохов И. И., Хон В. Ч., 2018:** Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // Доклады Академии наук. – Т. 481, № 1. – С. 89-94.

**Климатическая доктрина Российской Федерации. Утверждена Распоряжением Президента Российской Федерации от 17.12.2009 г. № 861-рп. URL:** http://kremlin.ru/events/president/news/6365.

**Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н., 2016:** Государственное управление развитием Арктической зоны Российской Федерации: задачи, проблемы, решения. Монография, науч. ред. академик В. В. Ивантер. – М.: Научный консультант. – 194 с.

**Макаров А. С., Миронов Е. У., Иванов В. В., Юлин А. В., 2022:** Ледовые условия морей российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году // Океанология. – Т. 62, № 5.

**Мохов И. И., 2020:** Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. – Т. 66 (4). – С. 446-462.

**Мохов И. И., Хон В. Ч., Прокофьева М. А., 2016:** Новые модельные оценки изменений продолжительности

навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Доклады Академии наук. – Т. 468, № 6. – С. 699-704.

**Мохов И. И., Хон В. Ч., 2015:** Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. – Т. 18, № 2. – С. 88-95.

**Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата до 2022 года.** Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 25.12.2019 г. № 3183-р. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/6365

**О перечне приоритетных проектов,** реализуемых на территории Арктической зоны Российской Федерации 05.2016 № 14605-АЦ/Д29и [Электронный ресурс] // URL: http:// arctic.gov.ru (Дата обращения: 13.10.2017).

**Пикалева А. А., Надежина Е. Д., Стернзат А. В., Борисенко В. А., Школьник И. М., 2016:** Исследование эволюции вечной мерзлоты на территории России с помощью моделей пограничного слоя атмосферы и теплопередачи в грунтах // Труды ГГО. – Вып. 581. – С. 24-40.

**Писаренко А. В., Страхов В. В., 2017:** Особенности адаптации лесов и лесного хозяйства России к изменениям климата // Использование и охрана природных ресурсов. – № 3. – С. 37-43.

**Порфирьев Б. Н. (ред.), 2017:** Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата – М., Научный консультант, 304 с.

**Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А., 2021:** Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // Вестник Российской Академии Наук. – Т. 91, № 2. – С. 105-114.

**Порфирьев Б. Н., Терентьев Н. Е., 2016:** Управление климатическими рисками развития российской Арктики: приоритет адаптации // Управление риском. – № 4. – С. 39-47.

**Порфирьев Б. Н., Хлебникова Е. И., 2015:** Строительство в условиях изменений климата в Арктике: риски и возможности их снижения. Экономика строительства. – № 6. – С. 4-15.

**РД 52.27.724-2019.** Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения – Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 66 с.

**Ревич Б. А., Малеев В. В., Смирнова М. Д., 2019:** Изменение климата и здоровье населения: оценки, индикаторы, прогнозы / Под ред. Б. А. Ревича и А. О. Кокорина – М.: ИНП РАН. – 196 с.

**Ревич Б. А., Терентьев Н. Е., 2015:** Оценка влияния климатических изменений на здоровье населения европейской части российской Арктики // Управление риском. – № 4. – С. 35-42.

**Свод правил СП131.13330.2012.** Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. – М.: Минрегион России, 2012. – 386 с.

**Свод правил СП20.13330.2011.** Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. – М.: Минрегион России, 2011. – 96 с.

**Спорышев П. В., Катцов В. М., Гулев С. К., 2018:** Изменения приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Доклады Академии Наук (Геофизика). – Т. 479, № 5. – С. 569-573.

**Стратегия развития** Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года Утверждена указом Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645. Ст. 15. URL: http://kremlin.ru/acts/news/64274.

**Стандарт организации** СТО 36554501-015-2008 «Нагрузки и воздействия» – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. – 52 с.

**Стратегия адаптации** к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и НАО Российской Федерации – Архангельск, 2012. – 100 с. URL: http://www.nsmu.ru/science/nii_pol_med/Izenenie_climata/Strategiya.nsmu.pdf.

**Сурина Е. А., Сеньков А. О., 2017:** Влияние изменения климата на северные леса европейской территории России. Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы II Международной научно-технической конференции (СПб., 24-26 мая 2017). – Т. 2. – С. 154-155.

**Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А., 2014:** Строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации – М., Росгидромет. – С. 801-830. http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52;

**Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А., Салль И. А., 2014:** Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс. Труды ГГО. – Вып. 574. – С. 125-178.

**Хлебникова Е. И., Катцов В. М., Пикалева А. А., Школьник И. М., 2018:** Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории российской Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология. – № 6. – С. 5-19.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2012:** Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в XXI в. // Труды ГГО. – Вып. 567С. – 45-84.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2013:** Климатические факторы энергопотребления в России: тенденции, вариабельность, неопределенность оценок // Труды ГГО. – Вып. 569. – С. 45-84.

**Хлебникова Е. И., Салль И. А., Школьник И. М., 2012:** Региональные климатические изменения как факторы влияния на объекты строительства и инфраструктуры // Метеорология и гидрология. – № 12. – С. 19-34.

**Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015:** Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – Вып. 576. – С. 201-211.

**Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации, 2005.** – СПб: Гидрометеоиздат. – 319 с.

**AMAP, 2017a:** Adaptation Actions for a Changing Arctic – Baffin Bay/Davis Strait Region Overview Report 2017. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017);

**AMAP, 2017б:** Adaptation Actions for a Changing Arctic – Barents Region Overview Report 2017. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017) https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604;

**AMAP, 2017в:** Adaptation Actions for a Changing Arctic – Bering/Chukchi/Beaufort Region Overview Report 2017. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017) https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Bering-Chukchi-Beaufort-Region/1615.

**AMAP, 2021:** Arctic climate change update 2021: key trends and impacts. Summary for policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Tromsø, Norway, 2021, 16 p.

**Box J. E., Colgan W. T., Christensen T., Schmidt N. M., Lund M., Parmentier F-J. W., Brown R., Bhatt U. S., Euskirchen E. S., Romanovsky V. E., Walsh J. E., Overland J. E., Wang M., Corell R., Meier W. N., Wouters B., Mernild S. H., Mård J., Pawlak J., Olsen M. S., 2019:** Key indicators of Arctic climate change: 1971-2017 // Environmental Research Letters, v. 14, № 4, p. 045010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b.

**IPCC, 2007:** Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по Изменению климата / Ред. Р. К. Пачаури, А. Райзингер и др. – Женева.

**Overland J., Walsh J., Kattsov V., 2017:** Trends and feedbacks. In: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA), pp. 9-23. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

**Overland J., Dunlea E., Box J. E., Corell R., Forsius M., Kattsov V., Olsen M. S., Pawlak J., Reiersen L.-O., Wang M., 2019:** The urgency of Arctic change // Polar Science, v. 21, pp. 6-13.

**Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2018:** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics, v. 50, № 1-2, pp. 215-230. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6.

**Shkolnik I. M., Efimov S. V., 2013:** Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties // Environmental Research Letters, v. 8, № 4, p. 045007.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

# Заключение

## Задачи и перспективы климатического обслуживания в Российской Федерации в условиях изменения климата

***В. М. Катцов***

*Настоящий доклад является третьим в серии оценочных докладов Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Как и два предыдущих доклада этой серии (Росгидромет, 2008; 2014), Третий оценочный доклад Росгидромета относится к одной из уже ставших традиционными форм климатического обслуживания Росгидрометом экономики и населения России. В связи с нарастающими климатическими угрозами, а также благодаря техническому прогрессу для климатического обслуживания – и в мире, и в нашей стране – наступил период интенсивного развития. Расширение круга задач климатического обслуживания (прежде всего в части адаптации к изменениям климата) неизбежно сказывается и на содержании оперативной деятельности Росгидромета, и на научно-исследовательской тематике его институтов, и на востребованности его информационно-аналитической продукции, включая оценочные доклады о климате.*

Под ***климатическим обслуживанием*** следует понимать создание информационной климатической продукции и предоставление ее потребителю с использованием тех или иных средств коммуникации и презентации. При этом под климатической продукцией понимается климатическая информация (данные о прошлом, настоящем и будущем) в преобразованном виде, пригодном для ее использования потребителем (от цифровых массивов и картографического материала до аналитических обзоров и рекомендаций).

В России климатическое обслуживание имеет уже более чем вековую традицию. За это время был накоплен бесценный опыт взаимодействия с потребителями и сформировалось хорошее понимание отраслевых запросов. Неизменной была опора на фундаментальную науку. Отечественная климатическая продукция на протяжении XX столетия задавала высокий стандарт для всего мирового сообщества (Катцов, 2015). Однако с развитием высоких информационных технологий в последние десятилетия отечественное климатическое обслуживание уступило лидирующие позиции в мире, по крайней мере, в оперативности, интерактивности и разнообразии.

До относительно недавнего времени климатическое обслуживание (которое следует отличать от смежных с ним гидрометеорологического и других видов обслуживания, связанных с окружающей средой) осуществлялось в предположении стабильности климата. Это неявное предположение было вполне приемлемым почти до конца XX века. Однако на сегодняшний день, когда наблюдаемое изменение глобального климата не вызывает сомнений, а научно обоснованные оценки его будущих изменений дают основания рассматривать эту проблему как один из крупнейших глобальных вызовов XXI века, круг задач климатического обслуживания впечатляюще расширился.

Очевиден дисбаланс между спросом общества и экономики на климатическую и другую информацию о состоянии окружающей среды и существующими возможностями ее предоставления. Дефицит информации не является сугубо российской проблемой. Эта проблема –

глобальная, особенно острая в развивающихся странах. В связи с этим Всемирная метеорологическая организация выступила с инициативой формирования Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания (ГРОКО). Формирование ГРОКО, старт которому был дан Внеочередным Всемирным Метеорологическим Конгрессом 29-31 октября 2012 г., начиналось на фоне усиления ряда глобальных тенденций в содержании климатического обслуживания:

- от смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему – к адаптации к погодно-климатическим воздействиям;
- от ограниченного числа потребителей климатического обслуживания – ко многим;
- от глобальных оценок изменения климата на дальнюю перспективу – к региональным и субрегиональным на ближайшие десятилетия;
- от климата средних – к экстремальным и опасным явлениям;
- от докладов о состоянии климата, выпускаемых с определенной периодичностью, – к оперативному обслуживанию потребителей (в том числе, на основе бесшовного прогнозирования: от часов – до десятилетий).

В последние годы к этим тенденциям добавились новые, обусловленные интенсивным технологическим развитием. Это развитие прежде всего привело к резкому увеличению объемов данных – как наблюдений, так и модельных, – доступных для использования в климатическом и смежных с ним видах обслуживания. Национальные гидрометслужбы как основные производители климатического обслуживания столкнулись с вызовом, связанным с так называемыми большими данными, который требует безотлагательного формирования соответствующих «***цифровых» стратегий*** – как на национальном, так и на международном (ВМО) уровне.

Все отчетливее проявляется конвергенция между климатическим и смежными видами обслуживания. Примером такой конвергенции является ***интегрированное городское экологическое и климатическое обслуживание*** (сюда же можно добавить и метеорологическое, и гидрологическое обслуживание) (см., например, Baklanov et al., 2017; IPCC, 2022).

На передний край выдвинулись также проблемы (и новые возможности) взаимодействия с частным сектором, который весьма активизировался, в особенности в обеспечении т.н. ***последней мили между производителем данных об окружающей среде и потребителем соответствующей продукции.***

В этой ситуации критически важным становится сохранение контроля со стороны национальных гидрометслужб над качеством предоставляемой потребителю информации, лежащей в основе климатической и смежных видов продукции. Доступность такой продукции для потребителя, привлекательность дизайна, удобство интерфейса, которые легко и умело могут быть обеспечены частным сектором, ни в коем случае не должны доминировать над качеством и достоверностью климатических и других данных об окружающей среде, научной обоснованностью их анализа и интерпретации.

Наконец, по мере проникновения климатического обслуживания во все сферы жизни общества, включая отрасли экономики и органы власти разного уровня, эффективное и плодотворное взаимодействие между производителями и потребителями климатического

обслуживания должно осуществляться с участием специалистов, обладающих надлежащими компетенциями. Потребность в таких специалистах, отвечающих, например, за создание, развитие и мониторинг эффективности отраслевых или региональных стратегий адаптации к изменениям климата, выдвигает на передний план проблему ***наращивания кадрового потенциала***. Важно формирование образовательных программ, подготовка и повышение квалификации кадров, обеспечивающих межведомственное взаимодействие, направленное на климатическое обслуживание, включая совершенствование и реализацию стратегий и планов адаптации к изменениям климата.

На сегодняшний день в России ***главной задачей*** климатического обслуживания, очевидно, является научное и информационно-аналитическое обеспечение ***адаптации экономики и населения страны***[1] не только к текущему состоянию климатической системы, но и к ожидаемым его изменениям. Научное обеспечение процесса адаптации к изменениям климата, следуя концепции ГРОКО, должно позволить обществу лучше управлять соответствующими рисками и использовать новые возможности, связанные с изменениями климата (Бедрицкий, 2020).

Развитие системы климатического обслуживания в Российской Федерации ориентируется на следующие пять компонентов ГРОКО:

- ***Платформа взаимодействия с потребителями:*** формирование механизмов взаимодействия учреждений системы Росгидромета и РАН с потребителями климатической информации разного уровня;
- ***Информационная система климатического обслуживания:*** разработка механизмов регулярного сбора, хранения и обработки информации о климате (прошлом, настоящем и будущем) для подготовки продукции и обслуживания, которые определяют решения в рамках широкого круга чувствительных к климату видов деятельности;
- ***Наблюдения и мониторинг:*** обеспечение устойчивого функционирования, модернизация и расширение наблюдательных сетей, прежде всего – Государственной наблюдательной сети; обеспечение сбора, управления и распространения данных климатических наблюдений и других данных, необходимых для удовлетворения потребностей конечных потребителей, а также для поддержки этих данных соответствующими метаданными;
- ***Исследования, моделирование и прогнозирование:*** развитие методической и нормативной базы климатического обслуживания на основе исследований климата, включая моделирование и прогнозирование изменений климата и их воздействий, повышение качества климатической информации;
- ***Развитие потенциала:*** подготовка и повышение квалификации кадров в системе климатического обслуживания.

В настоящее время есть все основания ожидать, что вместе с изменением климата потребности России в климатическом обслуживании продолжат возрастать. Это будет происходить одновременно с появлением новых возможностей (со стороны производителей обслуживания), обусловленных дальнейшим технологическим развитием, которое неизбежно сопровождается и возникновением новых вызовов.

Все расширяющееся поле для климатического обслуживания представляют собой отрасли

[1] См., например, Катцов и Порфирьев (2017).

экономики: изменились требования потребителей, разрастается инфраструктура, постоянно совершенствуются технические системы, появляются новые сферы применения климатической информации. Апробированные на протяжении многих лет методы классической климатологии и получаемая в результате стандартная климатическая информация, сохраняя свою значимость, уже не могут удовлетворить возросшие запросы практики. Перед каждой из прикладных ветвей климатологии: энергетической, строительной, сельскохозяйственной, медицинской и т.д. – возникают свои специфические задачи.

Данные наблюдений за состоянием климатической системы и ее изменениями служат ключевой информационной основой для выработки, практической реализации и последующей оценки результативности государственной климатической политики Российской Федерации в отношении целей и путей, пределов и механизмов адаптации к изменениям климата. Эти же данные в их совокупности необходимы для верификации современных физико-математических моделей климата, которые посредством сценарного прогнозирования состояния климатической системы позволяют, в частности, определить важнейшие потребности в упреждающей адаптации[1] к возможным в будущем изменениям климата. В свою очередь сценарные прогнозы изменений климата «подсказывают» направления развития Государственной наблюдательной сети, ее собственной адаптации к ожидаемым изменениям климата. Так, например, в последние годы стали очевидны неотложность расширения мониторинга состояния многолетней мерзлоты на территории России; потребность в адаптации гидрологической наблюдательной сети, ориентированной на «гидрологические» риски, связанные с ожидаемым изменением климата; а также необходимость целого ряда других действий, направленных на усиление климатического мониторинга как на суше, так и в океане, в том числе с использованием спутниковых технологий.

Тем самым можно с полным основанием утверждать, что поддержание на надлежащем уровне и всестороннее развитие потенциала[2] долгосрочных систематических наблюдений за климатом являются важнейшей задачей обеспечения эффективности климатического обслуживания.

Для разработки и климатологического обоснования стратегий адаптации к ожидаемым изменениям климата в Российской Федерации необходимо опираться на количественные оценки изменения климатического воздействия на экономику и социальную сферу, полученные с использованием физико-математического моделирования. В этой связи предстоит большая работа по развитию возможностей, которые предоставляют физико-математические модели, прежде всего за счет повышения сложности и радикального улучшения пространственного разрешения этих моделей – в условиях непрерывного увеличения доступных для исследо-

[1] Упреждающая адаптация является неотъемлемым элементом адаптации к относительно отдаленным изменениям климата. Например, уже сейчас при проектировании крупных гидротехнических сооружений, особенно в регионах мерзлоты или в регионах, подверженных риску катастрофических наводнений, должны учитываться (и уже учитываются) возможные изменения климатических параметров, от которых зависит резистентность таких сооружений в отношении опасных погодно-климатических явлений.

[2] В данном контексте термин «потенциал» представляет собой емкое понятие, включающее в себя компоненты технического, методического, метрологического, информационного обеспечения, систему обеспечения качества данных, квалификацию персонала и проч.

ваний и прогнозирования климата вычислительных ресурсов (Slingo et al., 2021; Slingo, 2022). В этом контексте особую значимость приобретают повышение качества прогнозирования экстремальных явлений, приводящих к большим ущербам, и создание систем раннего предупреждения (WMO, 2020)[1] – в качестве критически важных мер, направленных на снижение уязвимости населения, объектов инфраструктуры и экономики в целом к погодно-климатическим воздействиям.

Требуется также интенсивная разработка методов, моделей, технологий и стратегий (включая вышеупомянутые цифровые стратегии), обеспечивающих адекватное использование результатов мониторинга климатической системы и климатического моделирования.

Разработка, мониторинг эффективности и соответствующая корректировка адаптационных стратегий для хозяйствующих субъектов и социального сектора должна осуществляться с использованием международного опыта, включая современные методы, позволяющие учитывать неопределенности сценарных прогнозов климатических изменений и соответствующих воздействий.

Меры адаптации к текущим и ожидаемым климатическим воздействиям, которые могут применять отрасли и регионы, города, села и люди, очевидно, предполагают чрезвычайное разнообразие и разномасштабность; их эффективность может быть различной, равно как и их стоимость. В этой связи научная информация, основанная на анализе результатов наблюдений за климатической системой, ее физико-математического моделирования и сценарного прогнозирования, является лишь своего рода «увертюрой» – первоочередной, но не достаточной составляющей планирования и последующей корректировки стратегий адаптации к изменениям климата: результаты научных исследований климата далеко не исчерпывают потребностей адаптации.

Производители климатической информации должны быть лучше информированы о разнообразии климатически обусловленных решений в отраслях и об их чувствительности к изменению климатических параметров. В то же время со стороны производителей требуется обеспечить потребителей климатической информацией в том виде и объеме, который необходим для оценки рисков и оптимизации соответствующих решений. Реализация этой стратегии предполагает более глубокое понимание имеющихся возможностей и ограничений в применении климатических данных (в том числе – модельных сценарных прогнозов) с учетом специфических требований со стороны различных групп потребителей. Таким образом, климатическое обслуживание подразумевает тесное сотрудничество климатологов и отраслевых специалистов, которое могло бы способствовать развитию новых подходов в использовании информации о климате (на основе анализа экономических последствий принятия тех или иных решений и с учетом возможностей науки о климате) (Катцов, 2015).

[1] На сегодняшний день существует целый ряд научных проблем использования модельных данных в исследованиях климатических воздействий, требующих решения. Особого внимания заслуживают вопросы, связанные с подходами к формированию модельных ансамблей и супер-ансамблей (включая оптимальность размера ансамбля и проблемы дискриминации моделей в мультимодельных ансамблях (Павлова и др., 2014), с соотношением «добавленного качества» и «добавленных неопределенностей» при использовании различных инструментов и технологий пространственной детализации результатов моделирования климатической системы; с разной степенью доверия к оценкам будущих изменений различных климатических характеристик, а также специальные вопросы статистической интерпретации модельных климатических данных для прикладных целей (Катцов, 2015).

Важнейшей составляющей научного обоснования рекомендаций по адаптации являются ***социоэкономические оценки*** (Данилов-Данильян и др., 2020; Порфирьев и др., 2022). Именно социогуманитарные науки призваны дать ответы на ряд ключевых для планирования адаптации вопросов: о приемлемости тех или иных климатических рисков; о соотношении предотвратимого ущерба и затратности мер адаптации к ожидаемым климатическим воздействиям; о выборе оптимальной адаптационной стратегии, в том числе в отношении косвенных последствий климатических изменений и т.п.

Таким образом, необходима ***конвергенция*** – широкое междисциплинарное взаимодействие – выработка общего языка и поддержание непрерывного диалога между профессиональными климатологами, представителями «отраслевых», а также социогуманитарных наук, и субъектами адаптации. Именно многосторонний диалог должен способствовать надлежащему практическому применению информации о климате и – более широко – об окружающей среде. Этот диалог должен стать продолжением и развитием того взаимодействия между прикладной климатологией и отраслевыми науками, которое существует в нашей стране уже много десятилетий. Однако, как отмечалось выше, в условиях меняющегося климата такое взаимодействие приобретает новые измерения и распространяется на все большее число участников – специалистов и лиц, принимающих решения.

Резюмировать сказанное можно следующими тезисами.

- Главной задачей климатического обслуживания в России, очевидно, является научное и информационно-аналитическое обеспечение ***адаптации*** экономики и населения страны к текущему состоянию и ожидаемым изменениям климатической системы.
- Развитие национальной системы климатического обслуживания в России – на основе (1) ***высоких технологий***, связанных с использованием быстро развивающихся систем мониторинга климатической системы и сложных физико-математических моделей; а также (2) научно обоснованной ***интерпретации*** для прикладных целей все возрастающих объемов климатических данных – остается остро актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимы взаимодействие представителей различных областей науки и скоординированные усилия специалистов различных ведомств.
- Высококачественное климатическое обслуживание невозможно без глубоких ***фундаментальных и прикладных исследований.*** При этом ответственность климатологов в том, чтобы ответы на вопросы (и запросы) со стороны общества к климатическому обслуживанию (подчас некорректные) никогда не выходили за пределы современных научных знаний.

## Литература


**Бедрицкий А. И., 2020:** О разработке национальной платформы климатического обслуживания как российского национального компонента ГРОКО // Труды ГГО. – Вып. 596. – С. 7-36. (http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2020/Труды%20ГГО_вып%20596.pdf)

**Данилов-Данильян В. И., Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2020:** Проблема климатических изменений – поле сближения и взаимодействия естественных и социогуманитарных наук // Вестник РАН. – Т. 90, № 10. – С. 914-925.

**Катцов В. М., 2015:** Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / В сб. Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. – СПб.: Д Арт. – С. 66-80.

**Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2017:** Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды ГГО. – Вып. 586. – С. 7-20.

**Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., 2014:** Новое поколение климатических моделей. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / В. М. Катцов, С. М. Семенов, ред. – Росгидромет. – С. 286-320.

**Порфирьев Б. Н., Данилов-Данильян В. И., Катцов В. М., Ксенофонтов М. Ю., Ревич Б. А., Школьник И. М., Клюева М. В., Павлова Т. В., Колпаков А. Ю., Ползиков Д. А., Елисеев Д. О., Терентьев Н. Е., Рудакова Ю. Л., 2022:** Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы: монография / Под ред. акад. РАН Б. Н. Порфирьева, чл.-корр. РАН В. И. Данилова-Данильяна. – Москва: Научный консультант, 2022. – 514 с.

**Росгидромет, 2008:** Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Бедрицкий А. И. и др., ред. – М.: Росгидромет, том 1, 230 с., и том 2, 291 с.

**Росгидромет, 2014:** Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Катцов В. М., Семенов С. М., ред. – М.: Росгидромет. – 1009 с.

**Baklanov A., Grimmond C. S. B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R. K., Hovsepyan A., 2017:** From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services // Urban Climate, v. 23, pp. 330-341, https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.004

**IPCC, 2022:** Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

**Slingo J., Baeur P., Bony S., Flato G., Hegerl G., Hesselbjerg Christensen J., Hurrell J., Jakob C., Kattsov V., Kimoto M., Marotzke J., Raghavan K., Shepherd T., Stephens G., Stevens B., Stocker T., Sutton R., Zhou T., 2021:** Next generation climate models: a step change for net zero and climate adaptation. "Climate change: science and solutions" briefings series // The Royal Society, 9 pp. https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climate-science-solutions-modelling.pdf

**Slingo J., 2022:** Think big and model small // Nature Climate Change, v. 12, June 2022, p. 493. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01399-1

**WMO, 2020:** 2020 State of the climate services. Risk information and early warning systems. World Meteorological Organization. WMO-No. 1252, 48 p.

## Приложение 1.

## ГЛОССАРИЙ

**Аборигенный вид** – (от лат. *aborigenus* – коренной житель) виды, возникшие или с древних времен обитающие на определенной территории.

**Абразия** – разрушение и снос горных пород в береговой зоне водоемов волнами и прибоем, а также воздействием переносимого водой обломочного материала.

**Агроландшафт** – трансформированный земледелием природный ландшафт, естественная растительность которого на подавляющей части территории заменена агроценозами – сообществами организмов, функционирующими на территории, занятой культурными растениями: поля, плантации, огороды, сады, виноградники и др.

**Агроэкосистема** – *экосистема* (см.[1]), созданная с целью получения сельскохозяйственной продукции и регулярно поддерживаемая человеком.

**Адаптация** – процесс приспособления природных, антропогенных или смешанных природно-антропогенных систем, людей и их сообществ, субъектов экономики в ответ на фактические или ожидаемые воздействия (в частности, климатические), который позволяет уменьшить вред или использовать благоприятные возможности. Адаптация зависит от *чувствительности* (см.), *уязвимости* (см.) и меняющейся во времени приспособляемости систем к этим изменениям. Адаптация к изменениям климата на государственном уровне в Российской Федерации – это система мер политического, законодательного, нормативно-правового, экономического, социального характера, осуществляемых федеральными органами исполнительной власти и органами исполнительной власти субъектов федерации. Эти меры направлены на уменьшение уязвимости системы обеспечения национальной безопасности страны, субъектов экономики и граждан к последствиям изменений планетарного климата, климата на территории Российской Федерации, на территориях соседних государств и на прилегающих к ним акваториях Мирового океана, а также на использование благоприятных возможностей, обусловленных указанными изменениями.

**Адаптация на основе экосистем *(ecosystem-based adaptation – EbA)*** – использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг в рамках общей стратегии адаптации с целью способствовать улучшению благосостояния общества, в том числе коренных народов и местных общин, и помочь людям адаптироваться к неблагоприятным последствиям изменения климата.

**Азорский максимум** (Азорский антициклон) – антициклон в субтропических и тропических широтах Атлантического океана с центром вблизи 35-й параллели, вблизи Азорских островов; зимой имеет отрог на Северную Африку, летом – на Средиземное море и южную Европу; постоянный центр действия атмосферы.

**Акклиматизация** – приспособление организмов к новым условиям среды при переселении или изменении условий их местообитания.

**Активная температура** – температура воздуха или почвы, характеризующая период активной

[1] При помощи указателя (см.) здесь и далее указывается на то, что толкование термина присутствует в настоящем глоссарии. Такие термины выделяются курсивом.

жизнедеятельности живых организмов, выше их биологического минимума.

**Алиментарный механизм передачи инфекции** – механизм передачи инфекции, при котором проникновение возбудителя в восприимчивый организм происходит через рот, главным образом при заглатывании пищи.

**Альбедо** – доля солнечной радиации, отраженная поверхностью, зачастую выражаемая в процентах. Альбедо Земли в целом изменяется главным образом в результате изменения облачности, снежного, ледяного и растительного покровов.

**Альтиметрия** (спутниковая) – определение высоты земной поверхности и акватории Мирового океана с помощью измерений с искусственного спутника Земли.

**Аноксийные условия** – условия отсутствия кислорода.

**Ансамбль** – *в климатических моделях* (см.) – группа параллельных модельных расчетов, используемых в исследованиях климатической системы, а также для прогнозных оценок климата.

**Антициклон** – циркуляционная система: атмосферный вихрь с вращением воздуха по часовой стрелке в Северном полушарии. Область А. характеризуется повышенным давлением, нисходящими потоками воздуха и их дивергенцией. В области А. обычно наблюдается малооблачная погода с дефицитом осадков, зимой с пониженным, а летом с повышенным температурным фоном.

**Антропогенные выбросы** – выбросы в атмосферу парниковых газов, других газовых примесей и аэрозолей, связанные с хозяйственной деятельностью человека. Они являются результатом сжигания ископаемых видов топлива, а также обезлесивания и изменения в землепользовании.

**Антропогенный** – обусловленный деятельностью человека.

**Антропоноз** – группа инфекционных и паразитарных заболеваний, возбудители которых способны паразитировать в естественных условиях только в организме человека.

**Антропургический очаг** (заболевания) – очаг, обладающий характеристиками природного, но возникающий в результате хозяйственной деятельности человека – в населенных пунктах и других антропогенных ландшафтах, при освоении ранее не обжитых территорий.

**Ареал** (от лат. area – площадь, пространство) – часть земной поверхности (или акватории), в пределах которой встречается тот или иной вид (род, семейство и т.д.) живых организмов. Ареал называется сплошным, если вид встречается на всех соответствующих его жизненным требованиям (климатическим, биотическим, ландшафтно-географическим) местообитаниях, и прерывистым (дизъюнктивным), если между двумя или несколькими пространствами, заселенными каким-либо видом, есть промежутки настолько значительные, что любой контакт между разделенными ими популяциями вида исключен.

**Аридность** – сухость климата, приводящая к недостатку влаги для жизни растительных и животных организмов.

**Атлантическая междесятилетняя** (часто называют «многодекадная») **осцилляция**

**(АМО)** – ведущая мода изменчивости аномалий температуры поверхности океана в Северной Атлантике. Пространственная структура АМО характеризуется преобладанием аномалий одного знака на большей части акватории Северной Атлантики, с центром слабых аномалий противоположного знака у восточного побережья США.

**Атмосфера** – газовая оболочка Земли. Сухая атмосфера состоит практически целиком из азота (78,1% по объему) и кислорода (20,9%), а также ряда газовых примесей в чрезвычайно малых количествах, таких как аргон (0,93%), гелий и радиационно-активный диоксид углерода (0,037%) и озон. Кроме того, атмосфера содержит водяной пар, количество которого варьирует в широких пределах, но, как правило, составляет 1% состава смеси по объему.

**Атмосферная засуха** – погодные условия, способствующие развитию *засухи* (см.). Как правило, атмосферная засуха возникает в теплый период года в области малоподвижного (блокирующего) антициклона и характеризуется дефицитом осадков и повышенной температурой воздуха.

**Атмосферная циркуляция** – совокупность движений атмосферного воздуха с пространственными масштабами более сотен километров и временными масштабами более суток.

**Атмосферное обледенение** – образования льда на различных объектах при отрицательной температуре воздуха и наличии влаги в атмосфере.

**Атмосферные осадки** – вода в жидком или твердом состоянии, выпадающая на земную поверхность из облаков. Измеряются толщиной слоя воды, эквивалентного сумме выпавших осадков (мм).

**Аэрозоли** – совокупность взвешенных в атмосферном воздухе твердых или жидких частиц с характерным размером от 0,01 до 10 мкм, которые могут оставаться в атмосфере, по крайней мере, несколько часов. Аэрозоли могут быть как естественного, так и антропогенного происхождения и могут воздействовать на климат двумя способами: непосредственно, путем рассеивания или поглощения радиации, и опосредованно, являясь ядрами конденсации в облаках, изменяя тем самым их оптические свойства и время «жизни».

**Береговая эрозия** – разрушение берегов (в результате действия прибоя и т.д.).

**Биогенная нагрузка** – количество биогенных веществ, поступившее в водоем за рассматриваемый интервал времени; часто дается в расчете на единицу площади акватории или объема водной массы.

**Биогенные элементы** – химические элементы, постоянно входящие в состав организмов и выполняющие определенные биологические функции.

**Биом** – крупная региональная или субконтинентальная биосистема, характеризующаяся основным типом растительности или другой характерной особенностью ландшафта.

**Биомасса** – общая масса особей одного вида, группы видов или сообщества в целом, приходящаяся на единицу поверхности или объема.

**Биоразнообразие** – вариабельность живых организмов из всех источников, включая, сре-

ди прочего, наземные, морские и иные водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются; это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем (определение Конвенции о биологическом разнообразии).

**Биопродуктивность (биологическая продуктивность)** – способность природных сообществ или отдельных их компонентов поддерживать определенную скорость воспроизводства входящих в их состав живых организмов.

**Биоресурсы** – генетические ресурсы, организмы или их части, популяции или любые другие биотические компоненты экосистем, имеющие фактическую или потенциальную полезность или ценность для человечества (определение Конвенции о биологическом разнообразии).

**Биосфера** – оболочка Земли, состав, структура и энергетика которой определяются совокупной деятельностью живых организмов.

**Биоценоз** – исторически сложившаяся совокупность животных, растений, грибов и микроорганизмов, населяющих относительно однородное жизненное пространство (определенный участок суши или акватории), связанных между собой, а также окружающей их средой.

**Блокирующий антициклон (блокинг)** – высокий малоподвижный антициклон, развивающийся в умеренных широтах; преграждает западный перенос и отклоняет траектории подвижных циклонов и антициклонов от западно-восточного направления.

**Бореальный** – относящийся к природным условиям умеренного климата Северного полушария между 40° и 60° с.ш.

**Бюджет углерода экосистем** – разность между накоплением и потерями углерода в экосистеме.

**Вегетационный период** – период (часть года), в течение которого происходит рост и развитие (вегетация) растений.

**Ветровал** – выворачивание дерева вместе с корневой системой и оплетенным корнями комом земли под воздействием сильного ветра.

**Водная эрозия почв** – разрушение почвенного покрова под действием поверхностных водных потоков: дождевых, талых и поливных.

**Водообеспеченность региона (бассейна)** – количество возобновляемых водных ресурсов, которое приходится в год на одного жителя (тыс. $м^3$) или на единицу площади (объем на 1 $км^2$ площади, или слой в мм).

**Водосборный бассейн** – площадь, с которой поверхностные воды стекают в данный водный объект.

**Волна тепла (холода)** в некоторой географической точке – продолжительный период значительной положительной (отрицательной) аномалии температуры выше (ниже) некоторого заданного уровня.

**Гетеротрофное дыхание почв** – выделение $CO_2$ при разложении (минерализации) органического вещества почвы, состоит из дыхания микроорганизмов и дыхания почвенных жи-вотных.

**Гидросфера** – компонент *климатической системы* (см.), состоящий из поверхностных и подземных вод в жидком состоянии, таких как океаны, моря, реки, пресноводные озера, грунтовые воды и т.д.

**Гидротермический коэффициент** (ГТК) Селянинова – относительный безразмерный показатель увлажненности территории.

**Гидрофильные вещества** – вещества, хорошо растворимые в воде. Свойством гидрофильности (хорошей смачиваемостью водой) обладают вещества с ионными кристаллическими решетками (оксиды, гидроксиды, силикаты, сульфаты, фосфаты, глины и т.д.), вещества с полярными группами –OH, –COOH, $–NO_2$ и др.

**Гидрофобные вещества** – вещества, не растворимые или плохо растворимые в воде. Гидрофобностью (плохой смачиваемостью) обладает большинство органических веществ с углеводородными радикалами, металлы, полупроводники и т.д.

**Гипоарктический** – характерный для участка суши между тундрой (Арктика) и типичной тайгой, который включает в себя южную часть тундры, лесотундру и северные таежные редколесья.

**Глетчер каменный** – значительное скопление крупнообломочного материала в горах, содержащее лед. По внешнему виду напоминает ледник, лавовый поток или оползень. Иногда каменный глетчер бывает трудно отличить от конечной морены ледника, но в отличие от конечной морены, он способен медленно двигаться по долине или горному склону. Со временем подвижность глетчера теряется.

**Гляциально-нивальная зона** – пояс вечных снегов и ледников, занимающий верхнее положение в горах и в полярных областях, обычно выше снеговой линии, с круглогодичными отрицательными температурами воздуха.

**Градусо-сутки отопительного периода** – климатический параметр, используемый в строительном проектировании; рассчитывается путем умножения среднего многолетнего значения продолжительности отопительного периода на разность между температурой комфорта внутри помещения конкретного назначения и средним многолетним значением температуры наружного воздуха за отопительный период; является упрощенной оценкой среднего многолетнего значения дефицита тепла.

**Деградация земель** – снижение или потеря биологической и экономической продуктивности богарных и орошаемых пахотных земель или пастбищ в результате землепользования.

**Деградация криолитозоны, мерзлоты** – уменьшение запасов холода в толще *многолетнемерзлых* пород (см.) под влиянием как природных, так и техногенных факторов, приводящее к сокращению площади распространения, понижению температуры и уменьшению мощности *многолетнемерзлых пород* (см.) вплоть до полного их исчезновения.

**Дегумификация почв** – потеря почвой гумуса по разным причинам, но главным образом при изменении естественного хода почвообразования с освоением целинных почв и пастбищ под земледелие без применения специальных мероприятий по поддержанию гумусового состояния почв.

**Депрессия (атмосферная)** – область пониженного атмосферного давления у поверхности Земли.

**Дерново-подзолистые почвы** – подтип подзолистых почв. Содержат 3-7% гумуса, среди подзолистых почв наиболее плодородны. Рас-

пространены на юге лесной зоны Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин.

**Дефицит тепла** – климатический показатель потребления энергии на обогрев помещений; рассчитывается для года в целом или определенного периода года путем суммирования абсолютных отклонений средней суточной температуры наружного воздуха от выбранной базовой температуры; при расчете дефицита тепла рассматриваются только те сутки, когда температура воздуха была ниже базовой; в России основное внимание уделяется оценке дефицита тепла, рассчитываемого с использованием базовой температуры 18,3 °С для отопительного периода.

**Дефицит холода** – климатический показатель потребления энергии на охлаждение помещений; рассчитывается путем суммирования абсолютных отклонений средней суточной температуры наружного воздуха от выбранной базовой температуры; при расчете дефицита холода рассматриваются только те сутки, когда температура воздуха была выше базовой.

**Дефляция почв** – процесс захвата и переноса ветром рыхлого поверхностного материала, проявляется в районах с низким и неустойчивым выпадением осадков, большими перепадами температуры и испарения, а также сильным ветром.

**Диоксид углерода ($CO_2$)**, син. углекислый газ, двуокись углерода – природный газ, а также побочный продукт сгорания ископаемых видов топлива (нефть, газ и уголь), биомассы, изменений в землепользовании и других промышленных процессов. Он является основным *парниковым газом* (см.) антропогенного происхождения, нарушающим радиационный баланс Земли. Он рассматривается как базовый газ, с которым сравниваются другие парниковые газы, и поэтому его *потенциал глобального потепления* (см.) принимается равным 1.

**Дрейфующие океанографические буи** – автономные измерительные устройства, подвешиваемые на свободно плавающих буях.

**Дыхание почв** – продуцирование углекислого газа почвой и выделение его в атмосферу; представляет собой суммарный поток, образующийся в процессе дыхания подземных органов растений, в результате разложения органического вещества почвенной фауной и микроорганизмами (грибами и бактериями), а также за счет химических реакций и физических процессов.

**Закись азота ($N_2O$)** – парниковый газ, выбрасываемый в атмосферу в результате возделывания некоторых видов сельскохозяйственных культур с использованием определенных технологий, а также при сжигании ископаемых видов топлива, производстве азотной кислоты и сжигании биомассы. Один из шести парниковых газов, выбросы которого подлежат сокращению в соответствии с Киотским протоколом.

**Заморное явление** – гибель обитателей водоема, вызванная снижением содержания растворенного в воде кислорода или появлением в воде ядовитых веществ.

**Запасы почвенного углерода** – количество углерода в верхнем слое почвы (как правило, 0,3 или 1 м) в пересчете на площадь. Для расчета запаса используют формулу: A = aHdv•100, где A – запас элемента, г/м$^2$, в слое мощностью H, см; a – содержание элемента в этом слое,% на сухую почву; dv – плотность почвы в данном слое, г/см$^3$.

**Зарегулированный сток** – речной сток, режим которого изменен в сторону большей равномерности в течение года. При зарегулированном стоке расход воды в паводки уменьшается, а в межень увеличивается.

**Засуха** – длительный период времени в теплый период года с сильным отрицательным балансом почвенной влаги, обусловленным дефицитом осадков и/или повышенными температурами воздуха, в результате чего иссякают запасы влаги в почве и создаются неблагоприятные условия для нормального развития растений (см. также *атмосферная засуха*).

**Защитные леса** – леса, которые являются природными объектами, имеющими особо ценное значение, и в отношении которых устанавливается особый правовой режим использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов. Выделяются следующие категории защитных лесов: расположенные на особо охраняемых природных территориях; расположенные в водоохранных зонах; выполняющие функции защиты природных и иных объектов; ценные леса; городские леса.

**Зооноз** – группа инфекционных и паразитарных заболеваний, возбудители которых паразитируют в организме определенных видов животных и для которых животные являются естественным резервуаром. В ряде случаев способны передаваться человеку (зооантропонозы).

**Зоопланктон** – часть планктона, представленная животными организмами, которые не могут противостоять течениям и пассивно переносятся вместе с водными массами.

**Изменение климата** – изменение состояния *климатической системы* (см.), которое может характеризоваться (путем применения статистических тестов) изменениями среднего или изменчивости его свойств и может продолжаться в течение длительного периода, например, нескольких десятилетий и более. Изменение климата может быть вызвано естественными внутренними процессами или внешними воздействиями или в результате изменений антропогенного (см.) характера в химическом составе атмосферы и землепользовании. Следует отметить, что в статье 1 Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) «изменение климата» определяется следующим образом: «изменение климата, которое прямо или косвенно обусловлено хозяйственной деятельностью человека, вызывающей изменения в составе глобальной атмосферы, и накладывается на естественные колебания климата, наблюдаемые на протяжении сопоставимых периодов времени». Таким образом, РКИК ООН проводит различие между «изменением климата», обусловленным деятельностью человека, и «колебаниями климата», обусловленными естественными причинами. См. также *Изменчивость климата*.

**Изменчивость климата** – колебания среднего состояния и других статистических параметров (таких как стандартные отклонения, повторяемость экстремальных явлений и т.п.), описывающих климат, для всех временных и пространственных масштабов. Изменчивость может быть обусловлена естественными внутренними процессами в самой климатической системе (собственная изменчивость) или колебаниями естественного или *антропогенного* (см.) внешнего воздействия. См. также *Изменение климата*.

**Инвазивный (инвазионный) вид** – чужеродный вид, чья интродукция и/или распространение угрожает собой биологическому разно-

образию (местным видам, местам обитания или экосистемам).

**Индекс Атлантической междесятилетней осцилляции** – индекс, представляющий собой временной ряд осредненных от экватора до 70° с.ш. и взвешенных на косинус широты среднемесячных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики после удаления линейного тренда.

**Индекс Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation index)** – разность атмосферного давления в северных и южных широтах Атлантического сектора, в области Исландского минимума и Азорского максимума; характеризует интенсивность западного переноса воздушных масс (см. *Североатлантическое колебание (САК)*).

**Интенсивность осадков** – слой осадков, выпадающих за единицу времени, обычно за 1 мин.

Интразональная экосистема – экосистема, в которой почвы, растительные сообщества и группировки животных сформировались в условиях, резко отличающихся от основных зональных экосистем (болота, долинные леса, оазисы и др.).

**Исключительная экономическая зона** – район, находящийся за пределами *территориального моря* (см.) и прилегающий к нему, подпадающий под действие особого правового режима.

**Исландская депрессия** (Исландский минимум) – постоянный центр действия атмосферы: область на севере Атлантического океана между Гренландией и Европой с центром вблизи Исландии, характеризующаяся пониженным давлением на средней многолетней карте.

**Карстово-суффозионные процессы. Карст** – процесс растворения или выщелачивания трещиноватых растворимых горных пород движущимися (подземными и поверхностными) водами и связанное с ним образование специфических карстовых форм рельефа на поверхности Земли и на небольших глубинах. Под суффозией понимают процесс выщелачивания, выноса мелких минеральных частиц и растворимых веществ водой, фильтрующейся в толще рыхлых пород. Этот процесс вызывает оседание всей вышележащей толщи с образованием на земной поверхности мелких и крупных замкнутых понижений. Суффозия часто сопровождает карстовые процессы в закрытом типе карста, формируя карстово-суффозионные воронки и провалы.

**Климат** – в узком смысле этого слова климат обычно определяется как «средний режим погоды» или, более строго, как статистическое описание состояния *климатической системы* (см.), включающее средние значения и изменчивость, описываемой набором *климатических переменных* (см.) в течение достаточно длительного периода времени. По определению Всемирной метеорологической организации (ВМО), классическим периодом для расчета текущих «климатических норм» считается 30 лет. В более широком смысле климат представляет собой ансамбль возможных состояний климатической системы и его статистическое описание.

**Климатическая миграция** – перемещение лиц или групп лиц, которые, преимущественно по причине внезапного или медленно прогрессирующего изменения условий окружающей среды, вызванного изменением климата, были вынуждены покинуть свое постоянное место жительства или решили сделать это добро-

вольно и переселились временно или постоянно внутри своей страны или за ее границы. (Источник: Glossary on Migration. International Organization for Migration, 2019).

**Климатическая модель** – численное описание *климатической системы* (см.) на основе физических, химических и биологических свойств ее компонентов, их взаимодействий и процессов с обратными связями, которые полностью или частично описывают ее известные свойства. Климатическая система может быть описана с помощью моделей различной степени сложности – т.е. для каждого компонента или комбинации компонентов можно найти соответствующую «иерархию» моделей, отличающихся друг от друга в таких аспектах, как число пространственных измерений, в какой степени в явном виде описываются физические, химические и биологические процессы или до какого уровня осуществляется эмпирическая параметризация. Наиболее полное описание климатической системы обеспечивают глобальные объединенные модели общей циркуляции атмосферы и океана. В последнее время наблюдается тенденция к применению более сложных моделей с использованием интерактивных химических и биологических процессов – так называемых моделей земной системы. Климатические модели применяются в качестве инструмента исследования и прогнозирования климата. Особое место занимают региональные климатические модели – модели сравнительно более высокого разрешения для ограниченных территорий, используемые для пространственной детализации результатов расчетов с глобальными моделями в том или ином регионе.

**Климатическая переменная** – числовой показатель состояния какого-либо элемента *климатической системы* (см.). Соответствующими переменными в практических приложениях наиболее часто являются такие, как температура (в атмосфере, верхнем деятельном слое океана или суши), осадки, давление и ветер у поверхности Земли, поверхностный сток и др.

**Климатическая система** – сложная система, состоящая из пяти важнейших компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, поверхности суши и биосферы, и описывающая взаимодействия между ними. Климатическая система изменяется во времени как под воздействием собственной (внутренней) динамики, так и в результате внешних воздействий, например, извержения вулканов, вариаций потока солнечной радиации и воздействий, обусловленных хозяйственной деятельностью человека, таких как изменение состава атмосферы и изменения в землепользовании.

**Климатический ареал вида** – часть географического пространства, где климатические условия допускают устойчивое существование данного биологического вида.

**Климатический сценарий** – правдоподобное и зачастую упрощенное описание будущего климата на основе внутренне согласованного набора климатологических связей, которые были построены исключительно для анализа потенциальных последствий изменения климата под воздействием антропогенных факторов, обычно служащих в качестве исходных данных для использования в импактных моделях. В качестве исходного материала для разработки климатических сценариев часто берут прогнозные оценки климата. Однако климатические сценарии требуют, как правило, также дополнительную информацию, например, данные наблюдений за современным климатом. «Сценарий изменения климата» есть разность между

климатом, соответствующим некоторому сценарию, и современным климатом.

**Климатический тренд** – численный показатель (или набор показателей) наблюдаемой тенденции изменения какой-либо климатической переменной; обычно рассматривается линейный тренд, характеризующий среднюю скорость изменения за заданный промежуток времени.

**Климатическое убежище (рефугиум)** – участок земной поверхности или Мирового океана, где вид или группа видов пережили или переживают неблагоприятный для них период геологического времени, в течение которого на больших пространствах эти формы жизни исчезали.

**Континентальный шельф** – часть морского дна, являющаяся продолжением суши.

**Криогенные процессы** – преобразование геологической среды, вызванное проявлением в ней фазовых переходов: вода – водяной пар – лед и обусловленных ими физических, химических, биохимических и др. процессов. К. п. часто сопровождаются льдообразованием.

**Котловина (подводная)** – замкнутое понижение дна моря.

**Криолитозона** – (криолитосфера) – часть географического пространства, в которой распространены *многолетнемерзлые породы* (см.).

**Криосфера** – компонент климатической системы, состоящий из снега, льда и замерзшей почвы (включая *многолетнюю мерзлоту* (см.)) на поверхности и в глубине суши и океана.

**Ландшафт** – генетически однородная территория, на которой наблюдается закономерное повторение свойственных только данному ландшафту взаимосвязанных сочетаний природных компонентов: геологического строения, форм рельефа, поверхностных и подземных вод, микроклимата, почвенных разностей, фито- и зооценозов.

**Ландшафтная зона** – широтная природная полоса суши или Мирового океана, имеющая однородные термические условия и атмосферное увлажнение, а также относительно однородные элементы зональных ландшафтов, является составной частью географического пояса Земли.

**Ледник** – масса льда преимущественно атмосферного происхождения, испытывающая вязкопластическое течение под действием силы тяжести и принявшая форму потока, системы потоков, купола (щита). Образуются ледники в результате накопления и последующего преобразования твердых атмосферных осадков (снега) при их положительном многолетнем балансе.

**Ледниковый щит** – выпуклый плоско-куполовидный ледник, характеризующийся значительной (свыше 1000 м) толщиной, большой (свыше 50 тыс. км$^2$) площадью, примерно изометрической плановой формой и радиальным течением льда. Морфология и движение ледникового щита почти не зависит от рельефа ложа. Примеры – Антарктический, Гренландский, Новоземельский ледниковые щиты.

**Ледовая экзарация дна** – пропахивание морского дна ледяными образованиями.

**Ледовитость** – относительная часть (% площади) морской акватории, занятая льдом.

**Ледовые сжатия** – давление, оказываемое на объект при встречном движении ледяных полей.

**Ледовый шторм** – сильное волнение моря с плавающими льдинами.

**Ледокольный сбор** – плата за проводку судна ледоколом.

**Ледяной массив** – изменяющееся скопление сплоченного или очень сплоченного дрейфующего льда, занимающего сотни квадратных километров, встречающееся в одном и том же районе каждое лето.

**Ледяной покров** – лед, образующийся в холодное время года на поверхности водоемов (океанов, морей и т.д.), а также приносимый из соседних районов.

**Литозем** – почва с органогенным горизонтом разной природы мощностью не более 30 см, залегающим непосредственно на плотной коренной породе.

**Макрозоопланктон** – совокупность зоопланктонных организмов размером от 5 до 100 мм, Представлен в основном эвфаузиидами и медузами.

**Мезозоопланктон** – совокупность зоопланктонных организмов размером от 1 до 5 мм.

**Мерзлота** – физическое состояние пород с отрицательной или нулевой температурой, в которых вся содержащаяся вода или ее часть превращена в лед. Выделяются: 1) *многолетняя* («вечная») м. (см.); 2) м. кратковременная (*перелетки*, см.) и 3) м. сезонная – с сезонным циклом промерзания и оттаивания пород, подстилаемых немерзлыми и талыми породами.

**Мерзлые грунты** – грунты всех видов, имеющие отрицательную температуру и содержащие лед. Отрицательная температура – необходимое, но недостаточное условие для отнесения грунта к категории мерзлого. При отсутствии льда грунты с отрицательной температурой называются морозными (в основном это скальные и полускальные грунты) или охлажденными (все грунты с солеными поровыми растворами и минерализованными подземными водами). По продолжительности существования в мерзлом состоянии м.г. делятся на кратковременномерзлые (часы, сутки), сезонномерзлые (месяцы) и *многолетнемерзлые* (см.) – син. вечномерзлые (годы, тысячелетия).

**Метан ($CH_4$)** – углеводород, являющийся парниковым газом, основной компонент природных горючих, попутных нефтяных и рудничных газов; образуется в результате анаэробного (без доступа кислорода) разложения отходов в свалках, интестинальной ферментации животных, разложения останков животных, неполного сгорания ископаемых видов топлива; высвобождается из недр при добыче и распределении природного газа и нефти, добыче угля. Метан является одним из шести парниковых газов, выбросы которых подлежат сокращению в соответствии с Киотским протоколом.

**Микробная деструкция** – процесс биоразложения органических веществ.

**Минерализация органического вещества почв** – процесс, в ходе которого углерод и питательные вещества преобразуются в $CO_2$ и растительные формы азота (N), фосфора (P) и серы (S).

**Многолетнемерзлая порода** (вечномерзлая – уст.) – порода, температура которой на-

ходится ниже 0 °С на протяжении двух и более последовательных лет.

**Многолетние морские льды** – морской лед, оставшийся после окончания летнего таяния.

**Многолетняя мерзлота** – часть литосферы с отрицательной температурой пород, сохраняющейся в течение двух и более последовательных лет.

**Мода Восточная Атлантика** – Западная Россия (ВАЗР) – одна из ведущих мод атмосферной циркуляции в атлантико-европейском секторе: зонально-ориентированный диполь в поле давления с центрами действия над востоком Северной Атлантики и над ЕТР. Оказывает существенное влияние на аномалии климата ЕТР, в особенности летом, когда в отрицательной фазе ВАЗР резко возрастает блокирующая антициклоническая активность с сильно повышенным температурным фоном и дефицитом осадков.

**Морской лед** – любая форма льда, встречающегося в море и образовавшегося в результате замерзания морской воды.

**Неморальный биом** – область умеренных и теплоумеренных листопадных широколиственных лесов.

**Неспецифическая профилактика** – мероприятия в отношении источника возбудителя инфекции и механизма передачи (изоляция больных, прерывание путей передачи возбудителя, защита лиц, находящихся в контакте с больным), а также мероприятия по повышению устойчивости восприимчивого организма к возбудителям болезни.

**Несущая способность** – способность грунтов удерживать вес стоящих на них сооружений.

**Нетрансмиссивные заболевания** – заболевания человека, распространение которых происходит без участия организмов-переносчиков.

**Нозоареал** – совокупность территорий, на которых регистрируются или регистрировались в недалеком прошлом активные очаги инфекционной (инвазионной) болезни.

**Нулевая обработка почв** – от англ. No-Till («не вспахивать») – современная система земледелия, при которой почва не обрабатывается, а ее поверхность укрывается специально измельченными остатками растений – мульчей. Поскольку верхний слой почвы не рыхлится, такая система земледелия предотвращает водную и ветровую эрозию почвы, а также значительно лучше сохраняет воду.

**Облачно-радиационное воздействие** – разность между радиационным балансом облачной и безоблачной атмосферы на верхней границе атмосферы (Вт/м$^2$).

**Облесение** – выращивание новых лесов на территориях, которые ранее не находились под ними.

**Обнаружение изменения климата** – установление факта изменения климата по данным наблюдений в соответствии с некоторыми заданными статистическими критериями.

**Общее содержание озона** – суммарное число молекул озона в атмосферном столбе с площадью основания 1 см$^2$.

**Опасное гидрометеорологическое явление** – метеорологическое, агрометеорологи-

ческое, гидрологическое и морское гидрометеорологическое явление и (или) комплекс гидрометеорологических величин, которые по своему значению, интенсивности или продолжительности представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб объектам экономики и населению

**Опустынивание** – деградация земель в засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах в результате действия различных факторов, в том числе изменения климата и деятельности человека.

**Органическое вещество почвы** – совокупность всех органических веществ, находящихся в форме гумуса и остатков животных и растений.

**Органогенные горизонты почв** – к органогенным относятся почвенные горизонты, содержащие более 30% органического вещества.

**Оробиом** – горный биом.

**Осадки экстремальные** (см. *Экстремальное погодное явление*) – осадки большой интенсивности, которые случаются редко в некотором пункте за период наблюдений. «Редко» обычно означает, что интенсивность осадков превосходит заданный процентиль на верхнем «хвосте» функции распределения осадков в данном пункте (например, 95-й).

**Осолонцевание почв** – приобретение почвой специфических морфологических и других свойств, обусловленное вхождением ионов натрия и магния в почвенный поглощающий комплекс, что рассматривается как самостоятельный процесс неблагоприятных изменений почв засоленного ряда.

**Отопительный период** – временной интервал между устойчивым переходом средней суточной температуры воздуха вниз через уровень +8 °С осенью и устойчивым переходом средней су-точной температуры воздуха вверх через уровень +8 °С весной; при этом переход считается устойчивым, если температура остается ниже (выше) соответствующего уровня не только в те сутки, когда произошел переход, но также и в течение пяти последующих суток.

**Параметризация** – в *климатических моделях* (см.) этот термин относится к методике описания процессов, не поддающихся точному расчету вследствие недостаточного пространственного или временного разрешения модели (процессы подсеточного масштаба), посредством использования соотношений между крупно-масштабными движениями, явно описываемыми моделью и осредненным по времени и пространству эффектом процессов подсеточного масштаба.

**Парниковые газы** – газовые составляющие *атмосферы* (см.) как естественного, так и *антропогенного* (см.) происхождения, которые поглощают и излучают волны определенной длины в диапазоне инфракрасного излучения, испускаемого поверхностью Земли, атмосферой и облаками. Это свойство порождает парниковый эффект. Водяной пар ($H_2O$), углекислый газ ($CO_2$), закись азота ($N_2O$), метан ($CH_4$) и озон ($O_3$) относятся к категории основных парниковых газов. Кроме того, в атмосфере содержится еще целый ряд парниковых газов полностью антропогенного происхождения, таких как галоидуглероды и другие хлор- и бромсодержащие вещества, регулируемые Монреальским протоколом. Помимо $CO_2$, $N_2O$ и $CH_4$, под действие Киотского протокола подпадают такие парниковые газы, как гексафторид серы ($SF_6$), гидрофторуглероды (ГФУ) и перфторуглероды (ПФУ).

**Первичная продукция** – биомасса или энергия, накопленная продуцентами за единицу времени на единицу пространства. Различают валовую первичную продукцию, равную общему количеству продуктов фотосинтеза за определенный отрезок времени, и чистую первичную продукцию, равную разности между валовой первичной продукцией и той ее частью, которая использовалась для дыхания растительных организмов (например, фитопланктона).

**Перелеток** – в геокриологии – линза мерзлых пород, сохраняющаяся на некоторой глубине как остаток слоя сезонного промерзания в течение всего теплого периода года или нескольких лет; п. – типичное явление для областей вблизи южной границы *многолетнемерзлых пород* (см.).

**Переносчики** – живые организмы, способные передавать патогенные микроорганизмы от человека к человеку или от животных людям.

**Планктон** – совокупность растительных и животных организмов, живущих в водной толще и пассивно переносимых течениями вод.

**Повышение уровня моря** – изменение глобального среднего уровня моря вследствие изменения объема Мирового океана. Повышение относительного уровня моря происходит в случае интегрального повышения уровня океана по отношению к местному перемещению суши. Специалисты по моделированию климата в значительной мере занимаются выяснением *эвстатического* (см.) изменения уровня моря. Специалисты по исследованию воздействия акцентируют свою работу на относительном изменении уровня моря.

**Показатель заболеваемости** – медико-статистический показатель, определяющий число заболеваний, впервые зарегистрированных за календарный год среди населения. Выражается числом заболевших на 100, 1000, 10 000, 100 000 человек в год.

**«Позеленение» тундры** – отклик тундровых экосистем на изменения климата, проявляющийся в увеличении интенсивности фотосинтеза, надземных запасов и продукции фитомассы в условиях роста продолжительности вегетационного периода, улучшении теплового режима почв и большей доступности питательных веществ для растений. Эффект хорошо идентифицируется по данным дистанционного зондирования.

**Полупроходные рыбы** – экологическая группа рыб, которые обитают в прибрежных зонах морей и мигрируют для нереста в низовья рек (например, вобла, лещ, сазан, многие виды бычков).

**Популяция** – совокупность организмов одного вида, длительное время обитающих на одной территории.

**Потенциал глобального потепления** – индекс, основанный на радиационных свойствах парниковых газов, определяющих радиационное воздействие заданного парникового газа единичной массы за выбранный интервал времени по отношению к диоксиду углерода. Потенциал глобального потепления характеризует комбинированный эффект этих газов с разным временем жизни в атмосфере и их относительную эффективность в поглощении уходящей инфракрасной радиации. Идеология Киотского протокола основана на оценках разовой (импульсной) эмиссии газов и их эффекта на временном интервале 100 лет.

**Природный очаг** – природная (неосвоенная) территория, на которой происходит непрерывная циркуляция возбудителя определенной инфекционной болезни среди восприимчивых животных.

**Природно-очаговые инфекции** – зоонозные инфекционные заболевания, возбудители которых существуют в природных очагах (резервуаром служат дикие животные).

**Прогноз климата** – оценка будущего состояния климата на временных масштабах от сезона до нескольких лет. Учитывая сложность климатической системы и принципиальную невозможность точного описания начальных условий, такие прогнозы являются, в принципе, вероятностными. См. также *Прогнозная оценка климата*.

**Прогнозная оценка климата** – количественная оценка реакции климатической системы в будущем на реализацию сценариев выбросов или концентраций парниковых газов и аэрозолей или сценариев радиационного воздействия, которые зачастую основаны на расчетах с помощью *климатических моделей* (см.). Прогнозная оценка климата отличается от *прогноза климата* (см.) тем, что в первой подчеркивается ее зависимость от используемых сценариев эмиссии, концентрации или радиационного воздействия, которые основаны на предположениях относительно, например, будущего социально-экономического и технологического развития, которые, в свою очередь, могут или не могут быть реализованы и поэтому является предметом большой неопределенности.

**Продуктивность сельскохозяйственных культур** – урожайность (т/га), продуцируемая сельскохозяйственным посевом под влиянием сложившихся агрометеорологических условий в течение вегетационного периода.

**Прокормитель** – хозяин эктопаразита (живущего на поверхности тела и на наружных органах животных и человека), на котором паразит осуществляет акт питания, не задерживаясь на нем долго.

**Пул углерода (резервуар, запас)** – компоненты климатической системы, в которых накапливаются парниковые газы: биомасса, мертвое органическое вещество, почвы и др. Измеряется в единицах массы.

**Радиационное воздействие** – изменение интегрального эффективного (нисходящий минус восходящий) потока радиации (выраженного в Вт/м$^2$) на уровне тропопаузы за определенный период времени в результате изменения во внешних факторах, таких как изменение концентрации углекислого газа или потока солнечной радиации. Обычно радиационное воздействие рассчитывается для условий восстановления в конце периода стратосферных температур до радиационного баланса, но при фиксированных (не нарушенных начальных) значениях всех тропосферных характеристик.

**Резервные леса** – леса, в которых в течение двадцати лет не планируется осуществлять заготовку древесины, за исключением заготовки древесины гражданами для собственных нужд.

**Резервуар возбудителя инфекции** – совокупность популяций одного или нескольких видов организмов, в которых при определенных природных и социальных условиях выживает и размножается популяция потенциального возбудителя-паразита.

**Речной (материковый) сток** – объем воды, прошедшей через определенный створ в единицу времени, чаще всего год.

**Североатлантическое колебание (САК)** – ведущая циркуляционная мода Северного полушария в атлантическом секторе. Проявляется в поле аномалии давления как меридионально ориентированный диполь, ассоциирующийся с постоянными центрами действия атмосферы – Исландским минимумом и Азорским максимумом. В сильной (положительной) фазе наблюдается усиление центров действия и, как следствие, зонального переноса. Оказывает существенное влияние на климатические аномалии в европейском секторе. Для численной характеристики САК предложен целый ряд различных индексов: двухточечные (разность нормированных аномалий давления в Рейкьявике и Понта-дель-Гада – или в Лиссабоне); одноточечные (аномалия давления в одном из этих пунктов); основанные на разложении поля давления (или геопотенциала) по эмпирическим ортогональным функциям.

**Сезонномерзлый слой** – поверхностный слой грунта (почвы), промерзающий в холодный период года и оттаивающий в теплый. Подстилается немерзлыми грунтами. Мощность сезонномерзлого слоя в конкретном месте меняется из года в год, определяясь величиной теплооборота при отрицательных температурах грунта.

**Сезонноталый слой** – син. сезоннопротаивающий, деятельный, активный слой – поверхностный слой грунта (почвы), ежегодно протаивающий в теплый сезон и промерзающий в холодный и ограниченный снизу толщей *многолетнемерзлых пород* (см.). Мощность сезонноталого слоя в конкретном месте изменяется из года в год, определяясь величиной теплооборота при положительных температурах грунта (почвы).

**Сель** – горный русловой поток (грязевой, грязекаменный, водокаменный, водоснежный, водоледяной), внезапно возникающий и характеризующийся пульсационным движением и значительным эрозионно-аккумулятивным действием. Формируется при выпадении обильных ливней, интенсивном таянии ледников или сезонного снежного покрова.

**Соленость морской воды** – суммарное содержание в граммах всех твердых минеральных растворенных веществ в 1 кг морской воды.

**Специфическая профилактика** – проведение иммунизации различных групп населения.

**Сплоченность (морского льда)** – отношение, выраженное в десятых долях и описывающее общую площадь морской поверхности, покрытую льдом как часть всей рассматриваемой площади. Суммарная сплоченность включает все существующие стадии развития, частичная может относиться к объему частной стадии или частной формы льда и представляет только часть суммарной сплоченности.

**Стамуха** – ледяное образование (торос), «сидящее» на морском дне.

**Стратификация вод** – разделение водной толщи водоема на слои различной плотности.

**Стратосфера** – слой атмосферы между тропосферой и мезосферой, от тропопаузы и до высоты 50-55 км. В нижнем слое стратосферы распределение температуры по высоте близко к изотермическому, а затем температура растет с высотой. Преобладающий западный перенос в стратосфере летом сменяется на восточный. Газовый состав близок к тропосферному, за исключением ничтожно-

го содержания водяного пара и высокого содержания озона.

**Сумма активных температур** – сумма за выбранный период времени средних суточных значений температуры воздуха или почвы, превышающих заданное пороговое значение.

**Сумма эффективных температур** – сумма за выбранный период времени превышений средними суточными значениями температуры воздуха или почвы заданного порогового значения.

**Сценарий радиационного воздействия** – правдоподобное описание будущего развития процесса радиационного воздействия, связанного, например, с изменением атмосферного газового состава или практики землепользования, либо с воздействием внешних факторов, таких как солнечная активность. Сценарии радиационного воздействия могут быть использованы в качестве исходного элемента в климатических моделях для прогнозных оценок изменения климата.

**Температура максимальная (минимальная)** – 1. Экстремальное значение температуры (воздуха, почвы), наблюдавшееся в данном месте в течение определенного промежутка времени: суток, декады, месяца. 2. Экстремальное значение средней температуры тех или иных календарных суток, декады, месяца или целого года за многолетний период (например, максимальная температура января).

**Температура поверхности моря** – температура тонкого поверхностного слоя морской воды толщиной от нескольких микронов до 1-2 см.

**Температура поверхностного слоя моря** – температура поверхностного слоя морской воды толщиной не более 1 метра.

**Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур** – показатель обеспечения потребности сельскохозяйственных растений в тепле. В данном докладе – *сумма активных температур* (см.) с порогом 10 °С.

**Термокарст** – геоморфологический процесс, сопровождаемый вымыванием оттаявшего материала и образованием просадок поверхности грунта.

**Термохалинная циркуляция** – крупномасштабная циркуляция океанских вод, обусловленная различной плотностью вод вследствие их различия в температуре и солености. В северной части Атлантического океана термохалинная циркуляция обусловлена движением теплых поверхностных вод на север и холодных глубоких вод – на юг, что приводит к переносу тепла в направлении к северу. Поверхностная вода уходит вниз в весьма ограниченных районах погружения, расположенных в высоких широтах.

**Территориальное море** – прибрежные морские воды шириной 12 морских миль.

**Торос** – нагромождение обломков льда, возвышающееся над ледяной поверхностью.

**Торосистость ледяного покрова** – относительная часть морского ледяного покрова, занятая торосами.

**Трансмиссивные болезни** – заболевания человека, возбудителями которых являются паразиты, вирусы и бактерии и передаваемые переносчиками.

**Трансфазовая передача** – способность кровососущих членистоногих, переносчиков воз-

будителей инфекции, сохранять возбудителей при метаморфозе.

**Тропосфера** – самая нижняя часть атмосферы, простирающаяся от поверхности Земли на высоту приблизительно 10 км в средних широтах (в пределах от 9 км в высоких широтах до 16 км в тропиках), где образуются облака и формируются «погодные» явления. В тропосфере температура обычно понижается с высотой.

**Трофическая цепь** (пищевая цепь, цепь питания) – взаимоотношения между организмами, через которые в экосистеме происходит трансформация вещества и энергии. Последовательность того, кто кого ест в биологическом сообществе (экосистеме) для получения питательных веществ и энергии, поддерживающих жизнедеятельность.

**Уровень моря** – положение свободной поверхности Мирового океана или моря, измеряемое относительно некоторого условного начала отсчета.

**Уязвимость к изменению климата** – степень, в которой объекты (системы) восприимчивы к неблагоприятным последствиям изменения климата и не могут справляться с этими последствиями. Уязвимость является функцией характера, величины и скорости климатических воздействий, которым подвергается данная система, а также ее чувствительности и адаптационного потенциала.

**Фенологический сдвиг** – изменения сроков наступления сезонных фаз (сезонных явлений) в живой природе.

**Фитопланктон** – растительная часть планктона, которая может осуществлять процесс фотосинтеза.

**Фотосинтез** – процесс, при котором в клетках зеленых растений и водорослей, содержащих хлорофилл, под действием энергии света образуются органические вещества из неорганических.

**Циклогенез** – процесс возникновения или развития циклонов.

**Циклон** – циркуляционная система: атмосферный вихрь с вращением воздуха против часовой стрелки в Северном полушарии. Область Ц. характеризуется пониженным атмосферным давлением, восходящими потоками воздуха и их конвергенцией. С Ц. связана система фронтов, где формируется облачная погода, часто с осадками. В области Ц. обычно зимой наблюдаются повышенные, а летом – пониженные температуры воздуха. Большинство циклонов на ранних и средних этапах развития являются высокоподвижными системами, перемещающимися с ведущим западным потоком.

**Циклоническая активность** – интегральный показатель, отражающий интенсивность циклонической циркуляции в атмосфере рассматриваемого региона. Основными характеристиками циклонической активности являются частота прохождения циклонов через рассматриваемую территорию, их площадь, а также глубина, то есть разность давления между центром и периферией циклона.

**Чистая первичная продукция** – вновь образованная в экосистеме растениями биомасса за какой-либо промежуток времени (обычно за год) на единице площади.

**Чувствительность к изменению климата** – степень, в которой свойства объекта (системы) изменяются как негативным, так и благоприят-

ным образом в результате климатических воздействий.

**Шельф** – выровненная область подводной окраины материка, примыкающая к суше и характеризующаяся общим с ней геологическим строением.

**Штормовой нагон воды** – нагон воды на побережье океанов и морей, вызванный штормовым ветром и приводящий к размыванию и разрушению грунтов, затоплению территории побережья и подпору воды в реках.

**Эвригалинные рыбы** – группа рыб, которые переносят значительные колебания солености. К ним относятся обитатели литорали, эстуариев рек, солоноватых водоемов.

**Эвстатические колебания уровня** – изменения уровня Мирового океана, связанные с изменениями объема воды в нем, а также изменениями емкости морей и океанов.

**Эвтрофикация** – (от др.-греч. εντροφια – «хорошее питание») – насыщение водоемов биогенными элементами, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов.

**Экосистема** – совокупность совместно обитающих организмов и условий их существования, находящихся в закономерной взаимосвязи друг с другом и образующих систему взаимообусловленных биотических и абиотических явлений и процессов.

**Экосистемные услуги** – выгоды, которые человечество получает от экосистем, т.е. услуги экосистем по обеспечению человечества природными ресурсами, здоровой средой обитания, иными экологически и экономически значимыми «продуктами». Среди экосистемных услуг выделяют: снабжающие (пища, вода, лес, сырье), регулирующие (воздействие на климат, контроль над наводнениями, стихийными бедствиями, качество водных ресурсов и пр.), культурные (рекреационные ресурсы, эстетические и духовные ценности природы) и поддерживающие (почвообразование, фотосинтез, круговорот азота и пр.) услуги.

**Экотон** – растительность переходного характера между соседними биомами или их сообществами.

**Экстремальное погодное явление** – редкое событие по критериям статистического распределения в данном конкретном пункте. Понятие «редкое» варьирует в определенных пределах, но обычно соответствует попаданию в 10%- или 5%-е «хвосты» распределения.

**Экстремальность климата** – статистика экстремальных значений параметров климатической системы; к экстремальным обычно относят значения «на хвостах» статистических распределений, например, за 10%-ми или 5%-ми процентилями.

**Эндемичный вид** – виды организмов, обитающие в пределах ограниченного пространства, изолированного географически или экологически от других местообитаний (например, в глубоких озерах, горах, на островах).

**Эрозия почв** – процесс разрушения почв и сноса продуктов этого разрушения потоками воды (водная эрозия) и ветром (ветровая эрозия), что приводит к появлению смытых почв.

## Приложение 2.

## Основные используемые в докладе сокращения

ААНИИ – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
АЗРФ – Арктическая зона Российской Федерации
АТР – Азиатская территория России
АЭС – атомная электростанция
БС – Балтийская система высот уровня моря
ВАЗР – Восточная Атлантика – Западная Россия (атмосферная мода)
ВВП – валовый внутренний продукт
ВИЭ – возобновляемые источники энергии
ВМО – Всемирная метеорологическая организация
ВНИИГМИ-МЦД – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных
ВНИРО – Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения
ВСТП – Всемирный совет по туризму и путешествиям
ВЭС – ветровые электростанции
ВЭУ – ветровые энергетические установки
ГГИ – Государственный гидрологический институт
ГГО – Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
ГеоТЭС – геотермальная электростанция
ГИЛ – государственная инвентаризация лесов
ГЛПС – геморрагическая лихорадка с почечным синдромом
ГЛР – государственный лесной реестр
ГНС – Государственная наблюдательная сеть
ГОИН – Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова
ГСА – Глобальная служба атмосферы
ГСНК – глобальная система наблюдений за климатом (GCOS- Global Climate Observing System)
ГРОКО – Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания
ГСОП – градусо-сутки отопительного периода
ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова
ГУАН – аэрологическая сеть Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК)
ГЭС – гидроэлектростанция
ДВНИГМИ – Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
ДФО – Дальневосточный федеральный округ
ЕГРПР – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России
ЕС – Евросоюз
ЕТР – Европейская территория России
ЕЭС – единая энергетическая система
ЖКХ– жилищно-коммунальное хозяйство
ИГКЭ – Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля
ИС – радиационный индекс сухости Будыко
КБР – Конвенция о биологическом разнообразии
КГЛ – крымская геморрагическая лихорадка
КПД – коэффициент полезного действия
ЛЗН – лихорадка Западного Нила
ЛЭП – линия электропередачи
МГУ – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата
МОТ – Международная организация труда
МОЦАО – модели общей циркуляции атмосферы и океана
МСОП – Международный союз охраны природы
МЧС – Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
НИС – научно-исследовательское судно

ОГЯ – опасные гидрологические явления
ООН – Организация объединенных наций
ООПТ – особо охраняемые природные территории
ОПА – оптическая плотность атмосферы
ОРЗ – острое респираторное заболевание
ОСО – общее содержание озона
ОЯ – опасные явления
ПФО – Приволжский федеральный округ
РАН – Российская академия наук
РВ – радиационное воздействие
РГГМУ – Российский государственный гидрометеорологический университет
РКИК – Рамочная конвенция ООН об изменении климата
РКМ – региональная климатическая модель
Росгидромет – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Росстат – Федеральная служба государственной статистики
САК – Североатлантическое колебание
СЗФО – Северо-Западный федеральный округ
СКАНД – скандинавская атмосферная мода
СКФО – Северо-Кавказский федеральный округ
СМП – Северный морской путь
СНГ – Содружество Независимых Государств
СНиП – строительные нормы и правила
СП – свод правил
СПС – снежный покров суши
СТС – сезонноталый слой
СФО – Сибирский федеральный округ
СЭС – солнечная электростанция
т.у.т. – тонна условного топлива (в качестве условного топлива в России принимается уголь с удельной теплотой сгорания 29,3 ГДж/т)
ТВП – температура воздуха вблизи поверхности
ТИНРО – Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
ТОИ ДВО РАН – Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук
ТПМ – температура поверхности моря
ТЦ – тропический циклон
ТЭС – тепловая электростанция
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
УФО – Уральский федеральный округ
ФО – Федеральный округ
ЦФО – Центральный федеральный округ
ЮФО – Южный федеральный округ
ЯНАО – Ямало-Ненецкий автономный округ
ACIA – The Arctic Climate Impact Assessment (доклад «Оценка климатических воздействий в Арктике»)
AMAP – Arctic Monitoring and Assessment Programme (Программа мониторинга и оценки Арктики)
AVISO – Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (Проект архивирования, валидации и интерпретации океанографических спутниковых данных)
BSRN – Baseline Surface Radiation Network (опорная сеть для измерения приземной радиации)
CDAS – Climate Data Assimilation System (система ассимиляции климатических данных)
CMIP – Coupled Model Intercomparison Project (Проект сравнения объединенных моделей)
CMIP3 – третья фаза проекта CMIP
CMIP5 – пятая фаза проекта CMIP
CMIP6 – шестая фаза проекта CMIP
CREAMS – Circulation Research of the East Asian Marginal Seas (Программа «Изучение циркуляции окраинных морей Азии»)
CRU – Climate Research Unit, University of East Anglia, UK (Подразделение исследования климата, Университет Восточной Англии, Великобритания)
CRUTEM4 – Variance-Adjusted Global (Land-Only) Gridded Air Temperature (Четвертая версия массива сеточных данных поверхностной температуры Подразделения исследований климата Университета Восточной Англии, Великобритания)

ECMWF – European Centre for Medium Range Weather Forecasting (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды)

ERA5 – ECMWF reanalysis (Глобальный реанализ атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды)

FAO – Food and Agriculture Organization (ФАО – Продовольственная и сельскохозяйственная организация)

GCOS – Global Climate Observing System (Глобальная система наблюдений за климатом)

GISTEMP – Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature Analysis (Анализ поверхностной температуры Годдардского института космических исследований, США)

GRUAN – GCOS Reference Upper-Air Network (Опорная аэрологическая сеть Глобальной системы наблюдений за климатом)

GSN – GCOS Surface Network (Наземная сеть Глобальной системы наблюдений за климатом)

GUAN – GCOS Upper-Air Network (Аэрологическая сеть Глобальной системы наблюдений за климатом)

HadCRUT4 – Hadley Centre/Climatic Research Unit gridded surface temperature data set (Четвертая версия массива сеточных данных поверхностной температуры Центра Хэдли/ Подразделения исследований климата, Университет Восточной Англии, Великобритания)

HadISST – The Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (Глобальный массив сеточных данных по морскому льду и поверхностной температуре Центра Хэдли, Великобритания)

HELCOM – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki Commission (ХЕЛКОМ – Хельсинкская комиссия)

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменениям климата)

J1/2/3 – Спутники Jason 1, 2, 3

JMA – Japan Meteorological Agency (Японское метеорологическое агентство)

MERRA – Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications, NASA (Современный глобальный реанализ для научных и прикладных исследований, НАСА, США)

MODIS – Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)

NASA – National Aeronautic and Space Administration (НАСА – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США)

NCAR – National Center for Atmospheric Research (Национальный центр атмосферных исследований, США)

NCEP – National Centers for Environmental Prediction (Национальные центры прогнозов окружающей среды, США)

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный разностный индекс растительности)

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США)

NSIDC – National Snow and Ice Data Center (Национальный центр данных о снеге и льде, США)

PET – Physiologically Equivalent Temperature (Индекс физиологически эквивалентной температуры)

$PM_{10}$ – Particulate matter < 10 pm (Мелкодисперсные частицы размером до 10 мкм)

RCP – сценарий антропогенного воздействия на климатическую систему группы Representative Concentration Pathway (РТК – репрезентативные траектории концентраций)

RCP2.6 – сценарий группы RCP антропогенного воздействия на климатическую систему, при котором предполагаемое радиационное воздействие к 2100 году станет 2,6 Вт/м$^2$

RCP4.5 – сценарий группы RCP антропогенного воздействия на климатическую систему, при котором предполагаемое радиационное воздействие к 2100 году станет 4,5 Вт/м$^2$.

RCP6.0 – сценарий группы RCP антропогенного воздействия на климатическую систему, при котором предполагаемое радиационное воздействие к 2100 году станет 6,0 Вт/м$^{2.}$

RCP8.5 – сценарий группы RCP антропогенного воздействия на климатическую систему, при котором предполагаемое радиационное воздействие к 2100 году станет 8,5 Вт/м$^2$.

SRES – Special Report on Emissions Scenarios, IPCC (СДСВ – Специальный доклад по сценариям выбросов, МГЭИК)

SSP – вероятные альтернативные сценарии эволюции общества и экосистем в XXI веке группы Shared Socioeconomic Pathway; (Путь совместного социально-экономического развития)

SSP1 – сценарий группы SSP «Устойчивость (переход на зеленый путь)»

SSP1-1.9 – сценарий в структуре SSP-RCP, где первый индекс показывает путь социально-экономического развития (SSP1), а второй – величину радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно 1,9 Вт/м$^2$ (RCP1.9)

SSP1-2.6 – сценарий в структуре SSP-RCP, где первый индекс показывает путь социально-экономического развития (SSP1), а второй – величину радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно 2,6 Вт/м$^2$ (RCP2.6)

SSP2 – сценарий группы SSP «Центральная часть дороги»

SSP2-4.5 – сценарий в структуре SSP-RCP, где первый индекс показывает путь социально-экономического развития (SSP2), а второй – величину радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно 4,5 Вт/м$^2$ (RCP4.5)

SSP3 – сценарий группы SSP «Региональное соперничество (каменистая дорога)»

SSP3-7.0 – сценарий в структуре SSP-RCP, где первый индекс показывает путь социально-экономического развития (SSP3), а второй – величину радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно 7,0 Вт/м$^2$ (RCP7.0)

SSP4 – сценарий группы SSP «Неравенство (разделенная дорога)»

SSP5 – сценарий группы SSP «Развитие на базе ископаемых видов топлива (переход на магистраль)»

SSP5-8.5 – сценарий в структуре SSP-RCP, где первый индекс показывает путь социально-экономического развития (SSP5), а второй – величину радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно 8,5 Вт/м$^2$ (RCP8.5)

SST – Sea Surface Temperature (Температура поверхности океана)

T/P – Спутник TOPEX/Poseidon

UTCI – Universal Thermal Climate Index (Универсальный индекс теплового комфорта)

WMO – World Meteorological Organization (Всемирная метеорологическая организация)

Научное издание

Третий оценочный доклад об изменениях климата
и их последствиях на территории Российской Федерации

Редакторы А. А. Киселев, Е. Л. Махоткина и Т. В. Павлова
Корректор Л. В. Бородина
Дизайн А. Б. Лукьянчук
Компьютерная верстка О. В. Аврах
Фото на обложке: «Гора Актуру, Республика Алтай, Россия». Автор Сергей Чуприн

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945-50-63

Подписано в печать 27.09.2022
Формат 60×84/8
Бумага офсетная. Печать офсетная
Объем 8,25 печ.л. Тираж 150 экз.

ISBN 978-5-907618-13-8

ISBN 978-5-907618-13-8