

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)**

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОСГИДРОМЕТА



**ДОКЛАД
О НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВАХ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ АДАПТАЦИИ
К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(в области компетенции Росгидромета)**

Санкт-Петербург, 2020 г.

УДК 551.583
ББК 26
Д63

Д63 Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). – Санкт-Петербург ; Саратов : Амирит, 2020. – 120 с.

В настоящей публикации представлены обобщенные Климатическим центром Росгидромета результаты исследований и разработок в области научно-методического обоснования отраслевых и региональных стратегий адаптации к текущим и ожидаемым изменениям климата.

Материалы настоящей публикации могут быть использованы федеральными и региональными органами государственной власти и другими организациями при планировании мер адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата.

Под редакцией

*доктора физико-математических наук В. М. Катцова,
академика, доктора экономических наук Б. Н. Порфирьева*

Авторский коллектив:

*Е. И. Хлебникова, Е. М. Аментьева, С. Ю. Гаврилова, С. В. Ефимов,
В. М. Ивахов, А. А. Караченкова, В. М. Катцов, А. А. Киселев, М. В. Ключева,
В. Н. Павлова, Т. В. Павлова, А. А. Пикалева, Б. Н. Порфирьев, Б. А. Ревич,
Ю. Л. Рудакова, В. В. Стадник, А. М. Стерин, С. С. Чичерин, И. М. Школьник*

ISBN 978-5-00140-565-8

© Климатический центр Росгидромета
Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Главная геофизическая
обсерватория им. А. И. Воейкова»
(ФГБУ «ГГО»), 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Введение.....	6
1 Концептуальные основы планирования адаптации.....	8
2 Роль Росгидромета в обеспечении процесса адаптации.....	13
3 Система наблюдений за климатом	21
4 Особенности наблюдаемых изменений приземного климата	29
5 Неблагоприятные проявления климатической изменчивости и их воздействия на экономику и население	34
6 Сценарное прогнозирование изменений климата на территории Российской Федерации	39
7 Ожидаемые изменения климатических воздействий на экономику и население	48
8 Обоснование адаптационных мероприятий и оценка их эффективности.....	67
Заключение.....	79
Приложение 1. Компоненты Государственной наблюдательной сети климатического мониторинга – современное состояние и потребности развития	81
Приложение 2. Научно-методические основы для разработки стратегий адаптации к изменениям климата отдельных отраслей экономики Российской Федерации (на примере сельского хозяйства).....	93
Приложение 3. Научно-методические основы для разработки стратегий адаптации к изменениям климата на региональном уровне (на примере Арктической зоны Российской Федерации).....	108

«Не стану спорить, что отдельным хозяевам часто не в пору бороться с климатом и погодой, но борьба примет совсем иной оборот, когда частным лицам помогут местные учреждения и особенно правительство. При разумных дружных усилиях борьба возможна и успех несомненен. Для этого нужно прежде всего знание. Однако, защищая знание, я не думаю, чтобы нужно было отложить всякие практические меры до того желательного момента, когда наука подвинется значительно далее. Нет, вспоминая французскую пословицу: *le meilleur est l'ennemie du bien*¹, много можно сделать и при нынешних наших сведениях.»

*Александр Иванович Воейков*²

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2020 г. началась реализация Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 года №3183-р³ (далее — Национальный план адаптации, НПА), который, в числе прочих мероприятий, подразумевает разработку планов адаптации отраслей национальной экономики, а также региональных планов адаптации — на уровне субъектов Российской Федерации.

По сути, первый этап адаптации носит подготовительный характер, направлен на формирование соответствующих нормативно-методических основ и правового поля, а также на разработку планов адаптации в отраслевом и территориальном разрезах. Последнее означает, в частности, повышение роли и ответственности органов государственной власти субъектов Российской Федерации за учет региональных особенностей адаптации. Это, в свою очередь, потребует мобилизации научного потенциала регионов для решения территориальных задач адаптации, налаживания механизма накопления опыта адаптации и обмена этим опытом. Важнейшим условием, которым проверяется приемлемость комплекса адаптационных мер является обеспечение соразмерности (по экономическим и неэкономическим критериям) затрат на адаптацию и масштаба потерь, предотвращаемых при реализации запланированных адаптационных мер. Оценку эффективности мер, принимаемых на разных уровнях для адаптации к изменениям климата, предстоит осуществить в ближайшие годы, а в будущем проводить ее на регулярной основе — с целью корректировки Плана и формулирования мероприятий второго этапа (2023—2025 гг.). При этом следует принимать во внимание чрезвычайное разнообразие изменяющихся климатических условий на обширной территории страны, что вносит специфические особенности в адаптационную политику Российской Федерации как на федеральном, так и на региональном уровнях и что существенно отличает Российскую Федерацию от большинства стран мира.

¹ Лучшее – враг хорошего (фр.)

² Воейков А. И., 1892: Климат и народное хозяйство России — Сборник в пользу голодающих крестьян, под ред. Д. Н. Анучина.

³ <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5Nlx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf>

Разработка отраслевых планов адаптации федеральными органами исполнительной власти, а затем и региональных планов адаптации субъектами Российской Федерации, намеченная НПА на ближайшие годы, требует формулирования общих научно-методических основ такого планирования, по крайней мере, в сфере ответственности Росгидромета. Росгидромет занимает особое место в реализации НПА — не только как главный источник информации о происходящих и ожидаемых изменениях климата на территории России, но и как федеральный орган исполнительной власти, на протяжении многих десятилетий обеспечивающий соответствующий аспект устойчивого развития нашей страны.

Настоящий доклад был подготовлен в рамках Целевой научно-технической программы Росгидромета «Научно-исследовательские, опытно-конструкторские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» за 2017—2019 гг. В докладе также использованы результаты научных исследований в рамках проектов, поддержанных Российским Научным Фондом (грант № 16-17-00063), Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-00-00600 (18-00-00596)).

Инициатива подготовки настоящего доклада принадлежит В. Г. Блинову. Большую работу по подготовке доклада к печати осуществили Е. Л. Махоткина и А. Н. Махоткин (ГГО). Координация подготовки доклада осуществлялась Климатическим центром Росгидромета на базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата затрагивают в той или иной степени сферу интересов любого субъекта и практически любой отрасли экономики и социальной сферы Российской Федерации. Планирование и осуществление многих крупных инвестиционных проектов в значительной мере чувствительны к вопросам учета климата и его изменений 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.⁴ 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 то же время принятые на сегодняшний день кратко- и среднесрочные программы развития большинства секторов экономики и регионов Российской Федерации не содержат мер адаптации к изменениям климата, либо предусматривают лишь меры реагирования на чрезвычайные ситуации, обусловленные последствиями резких погодно-климатических перемен.

В последнее десятилетие мировое сообщество уделяет все большее внимание разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата, в том числе в рамках национальных планов адаптации. Эти планы значительно отличаются друг от друга в зависимости от уровня развития стран, приоритетов государственной политики и степени подверженности экономики и социальной сферы погодно-климатическим рискам. В то же время им присущи общие черты и подходы, которые целесообразно учитывать при разработке планов адаптации в Российской Федерации. Одной из таких черт является использование при разработке стратегий и планов адаптации к изменениям климата развитых баз данных, пополняемых национальными и региональными климатическими центрами, осуществляющими климатический мониторинг и прогноз, а также **климатическое обслуживание**⁵ широкого круга потребителей.

На сегодняшний день главной задачей климатического обслуживания в России является научно обоснованное информационно-аналитическое обеспечение адаптации (в том числе, упреждающей адаптации) экономики и населения страны к текущему и ожидаемым состояниям климатической системы в соответствии с Национальным планом адаптации. Основой указанного информационно-аналитического обеспечения являются наблюдения, оценка и прогнозирование изменений климата и их последствий.

Выработка базовых подходов к способам и механизмам адаптации к изменению климата, а также их развитие, должны осуществляться на основе продолжающихся научных исследований погоды и климата, а также специальных прикладных

⁴ Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2017. Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 586, с. 7—20. <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2017/586.pdf>

⁵ Под **климатическим обслуживанием** следует понимать создание информационной климатической продукции и предоставление ее потребителю с использованием тех или иных средств коммуникации и презентации. Под климатической продукцией понимается климатическая информация (данные о состоянии и изменении климата и климатических воздействиях в прошлом, настоящем и будущем) в преобразованном виде, пригодном для ее использования потребителем (от цифровых массивов и справочников до аналитических обзоров и рекомендаций).

исследований, выполняемых при взаимодействии специалистов-климатологов с потребителями климатической информации.

В качестве фундаментальных источников, широко освещающих естественно-научные основы адаптации, можно рассматривать Оценочные доклады об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008 и 2014 гг.)⁶, другие публикации Росгидромета⁷, а также международные доклады, прежде всего — Оценочные Доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).⁸

Настоящий Доклад является синтезирующим по своей сути и — наряду с базовыми представлениями о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации — отражает современное состояние научно-исследовательских работ в рассматриваемой области, а также вектор их развития.

⁶ Здесь и далее: 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>.

⁷ 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., Порфирьев Б. Н., ред.) — М.: Росгидромет, 251 с. (<http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2015/Mokryk.pdf>); Анисимов О. А., Борщ С. В., Георгиевский В. Ю. и др., 2012: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. (Семенов С. М., ред.) — М.: ФГБУ «НИЦ Планета», 512 с.;

Оценка Стратегического прогноза изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2010—2015 гг. и их воздействий на отрасли экономики России — СПб: Климатический центр Росгидромета, 44 с. (<http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/osp-rgm.pdf>);

Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., Говоркова В. А., Елисеев Д. О., Ефимов С. В., Киселев А. А., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Ревич Б. А., Спорышев П. В., Терентьев Н. Е., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2017: Изменения климата Арктики: место климатической науки в планировании адаптации. (Катцов В. М., ред.) — СПб: Климатический центр Росгидромета. 104 с. (http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2019/Arctica_print.pdf);

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, 2017. — СПб: Климатический центр Росгидромета. 106 с. (<http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf>).

⁸ <https://www.ipcc.ch>

1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ АДАПТАЦИИ⁹

Адаптация к изменениям климата на государственном уровне — это система мер политического, законодательного, нормативно-правового, экономического, социального характера, осуществляемых федеральными органами исполнительной власти и органами исполнительной власти субъектов Российской 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.

Разработка стратегий адаптации к текущим и ожидаемым изменениям климата предусмотрена Климатической доктриной Российской Федерации и международными соглашениями в области изменений климата, прежде всего статьей 7 Парижского соглашения по реализации Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК), одобренного Российской Федерацией в ходе 21-й сессии Конференции сторон РКИК в декабре 2015 г. Концепция планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата (далее — Концепция) определяет цели, задачи, уровни, принципы, этапы и приоритеты планирования, осуществления, контроля (мониторинга, отчетности и проверки) и анализа результатов, а также корректировки принятых мер адаптации в разрезе регионов и отраслей экономики. Концепция соответствует положениям Климатической доктрины Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента Российской Федерации № 861-рп от 17 декабря 2009 г.¹⁰ Потребность в планировании адаптации Российской Федерации к изменениям климата в интересах устойчивого развития страны определяется также рядом других государственных решений и документов, таких как:

- Комплексный план реализации Климатической доктрины Российской Федерации до 2020 года, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации № 730-р от 25 апреля 2011 г.;
- Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ № 1235-р от 27 августа 2009 г.;
- Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная совместным приказом Минпромторга России № 248 и Минсельхоза России № 482 от 31 октября 2008 г.;
- Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденная указом Президента Российской Федерации № 120 от 30 января 2010 г.;
- Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата),

⁹ Этот раздел основан на Концепции Национального плана адаптации к изменениям климата, изложенной в работе: Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. (2017). Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 586, с. 7—20. <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2017/586.pdf>. Значительная часть этой Концепции вошла в состав Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г., утвержденного распоряжением Правительства РФ № 3183-р от 25 декабря 2019 г.

¹⁰ <http://kremlin.ru/acts/bank/30311>

утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации № 1458-р от 3 сентября 2010 г.

- Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г., утвержденный распоряжением правительства РФ № 3183-р от 25 декабря 2019 г.

Задачи планирования адаптации Российской Федерации к изменениям климата включают:

- научное обеспечение процесса разработки и принятия органами государственной власти и хозяйствующими субъектами решений, направленных на повышение уровня безопасности (защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства) от последствий изменений климата для населения и экономики, включая опасные природные явления и чрезвычайные ситуации природного характера;
- реализацию решений, обеспечивающих повышение уровня безопасности личности, общества и государства от вышеупомянутых последствий изменения климата, и значительное сокращение потерь и ущерба экономике страны от опасных погодно-климатических явлений;
- получение дополнительных выгод от благоприятного развития погодно-климатических процессов, увеличение экономического эффекта в отраслях экономики от использования информации о состоянии окружающей среды;
- актуализацию стратегий развития видов экономической деятельности и секторов экономики с учетом степени зависимости от погодно-климатических изменений и потребностей в адаптации к указанным изменениям, и обеспечение их реализации в рамках государственных целевых программ и инвестиционных проектов, а также проектов и программ частно-государственного партнерства;
- снижение рисков внешнеэкономической деятельности путем разработки и осуществления мер защиты российских товаропроизводителей от недобросовестных действий зарубежных партнеров по ограничению их конкурентоспособности под предлогом несоответствия требованиям климатической безопасности (адаптация к косвенным последствиям климатических изменений);
- обеспечение выполнения обязательств Российской Федерации по РКИК ООН, в том числе по Парижскому соглашению (2015 г.); полноценное участие Российской Федерации в построении Глобальной рамочной основы климатического обслуживания (ГРОКО) и создание национального сегмента ГРОКО.

Подготовка и реализация в Российской Федерации планов адаптации к изменениям климата осуществляются на общенациональном (федеральном) и региональном уровнях. На федеральном уровне уполномоченными органами исполнительной власти Российской Федерации разрабатываются и реализуются: общенациональный план адаптации, планы адаптации систем обеспечения национальной безопасности страны (включая оборону страны и гражданскую защиту); планы адаптации секторов национальной экономики, включая производственные комплексы и сферу услуг. На региональном уровне органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации разрабатываются и реализуются региональные планы адаптации, которые включают в себя планы действий местных (муниципальных) властей в рассматриваемой сфере.

Основные принципы организации планирования включают:

- дифференцированный подход, учитывающий: (а) природно-климатическую и социально-экономическую специфику адаптации различных секторов (сфер) экономики и регионов страны; (б) разную степень их готовности к разработке и реализации соответствующих планов; (в) различную эффективность мер адаптации на различных уровнях принятия решений (например, меры по снижению уязвимости наиболее подверженных опасным климатическим воздействиям объектов и территорий особенно эффективны на местном и региональном уровнях);
- стадийность и итеративность процесса планирования, подразумевающие наличие этапов разработки и реализации планов адаптации в виде последовательных приближений к гармонизации всех планов, синергизм их элементов, регулярную корректировку и дополнение планов адаптации новыми элементами;
- комплексность планирования, предполагающую: (а) разработку и реализацию мер превентивной (упреждающей) адаптации, нацеленных на снижение рисков (ожидаемых последствий) климатических изменений (например, сооружение дамб от наводнений, лесозащитных полос, расширение посевов засухоустойчивых культур и т. д.), и мер (пост-) кризисной адаптации, предусматривающих смягчение последствий (снижение ущерба) реального опасного воздействия или чрезвычайной ситуации (например, эвакуацию, вакцинацию и временное расселение пострадавших от бедствия); (б) разработку и реализацию мер адаптации к прямым (реальным и ожидаемым) последствиям изменений климата для населения, экономики и государственного управления развитием России и мер адаптации к косвенным последствиям климатических изменений, проявляющихся в действиях зарубежных корпораций и / или государств или их групп по ограничению или ухудшению условий внешнеэкономической деятельности, или снижению конкурентоспособности российских товаропроизводителей;
- гармонизацию и интеграцию планов адаптации, предполагающие согласованность и взаимную дополняемость: (а) мер превентивной и (пост-) кризисной адаптации; (б) планов адаптации на федеральном и региональном уровнях;
- иерархию планирования, в том числе приоритет национального плана адаптации, выполнению целей и задач которого подчинены другие федеральные, а также региональные планы адаптации, конкретизирующие и детализирующие национальный план адаптации в соответствующих измерениях (разрезах);
- принцип обратной связи, предусматривающий организацию мониторинга и оценки эффективности реализации и, на этой основе, корректировку планов адаптации;
- надлежащее научное обеспечение прогнозирования климата и климатического обслуживания.

Ограниченность доступных ресурсов делает особо важной научно обоснованную количественную оценку и прогноз рисков и ущерба экономике с учетом отраслевой и территориальной специфики потребителя, что необходимо для принятия эффективных решений по адаптации на федеральном, региональном и местном уровнях.

Основными направлениями планирования адаптации к изменениям климата в Российской Федерации являются:

- повышение осведомленности федеральных органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, инвесторов, бизнес-сообществ, негосударственных некоммерческих организаций и населения о погодно-климатических рисках, текущих и ожидаемых климатических воздействиях, возможных мерах реактивной и упреждающей адаптации в процессе осуществления организациями хозяйственной и иной деятельности на территории Российской Федерации;
- создание информационной базы для разработки целевых показателей принимаемых адаптационных мер по стране в целом и отдельным секторам экономики, а также для мониторинга и соблюдения этих показателей в ходе реализации государственной климатической политики и мер, направленных на адаптацию к текущим и ожидаемым изменениям климата;
- создание необходимых предпосылок для осуществления контроля за реализацией на территории Российской Федерации НПА, а также региональных и отраслевых планов адаптации с использованием механизмов государственной поддержки.

Необходимыми предпосылками для планирования адаптации, а также осуществления надлежащего контроля реализации планов адаптации являются:

- формирование в Российской Федерации необходимой нормативно-правовой, методической и институциональной базы для внедрения системы адаптации, отчетности и проверки эффективности принятых мер. Соответствующие документы должны устанавливать порядок подготовки и представления субъектами адаптации отчетов о мерах адаптации, порядок приемки и проверки представленных отчетов уполномоченными государственными органами исполнительной власти, а также ответственность субъектов адаптации за непредставление или несвоевременное представление отчетов о реализации планов адаптации, или представление недостоверных сведений о результатах их реализации;
- формирование необходимой нормативно-правовой, методической и институциональной базы для проведения независимой оценки (проверки) проектов адаптации, представленных к реализации с использованием механизмов государственной поддержки, на соответствие требованиям, установленным законодательством Российской Федерации, а также для проверки и заверения сведений (отчетов) о результатах применения адаптационных мер в ходе реализации таких проектов для получения государственной поддержки. Соответствующие документы должны определять требования к квалификации экспертных организаций для осуществления указанных функций, порядок их аккредитации, приостановки и прекращения такой аккредитации в случае выявленных нарушений в деятельности экспертных организаций, а также ответственность независимых экспертных организаций и их руководителей за представление заведомо ложных заключений;
- разработка и утверждение методических рекомендаций по проведению инвентаризации и подготовке отчетности реализации планов адаптации в субъектах Российской Федерации.

Основные элементы плана адаптации включают:

- анализ и оценку современных и будущих погодно-климатических рисков, в том числе: (а) текущего состояния климатической системы и сценариев будущих изменений климата; (б) подверженности и уязвимости объекта под риском; (в) допустимых значений рисков с учетом экономических и социальных факторов;
- оценку адаптационного потенциала, включая определение перечня сценариев (вариантов) адаптации, связанных с ними основных мер и располагаемых ресурсов, а также ограничений возможности (пределов) адаптации;
- оценку социально-экономической эффективности (соотношения затрат, рисков (потерь) и выгод) реализации конкретных сценариев адаптации, установление их приоритетов и выбор наилучшего сценария по этому критерию;
- составление детального плана адаптации, включая мониторинг, оценку хода и результатов реализации мероприятий, с учетом перечисленных выше принципов организации планирования и указанием конкретных мер, сроков исполнения, ответственных исполнителей, объемов и источников финансирования.

С учетом значительной неопределенности будущих климатических и социально-экономических условий в процессе планирования приоритет следует отдавать мерам адаптации, которые:

- наряду с проблемой снижения уязвимости к последствиям климатических изменений способствуют эффективному решению ключевых задач социально-экономического развития (снижению производственных издержек, сокращению вредных выбросов в окружающую среду, созданию новых рабочих мест и т. д.), являясь, таким образом, беспроигрышными мерами;
- используют успешный опыт адаптации экономики и общества к современной изменчивости климата как предпосылку адаптации к будущему климату;
- опираются на сценарии изменений климата, малочувствительные к точности прогнозных оценок указанных изменений, и используют методы управления и принятия решений, относительно устойчивые к неопределенности;
- обеспечивают интегрированное управление использованием природных ресурсов, тем самым обеспечивая его комплексный характер.

Национальный план адаптации к изменениям климата, принятый к настоящему времени в России, является первым этапом мероприятий по адаптации экономики и населения к изменениям климата и включает в себя институциональные, организационные и методические мероприятия, направленные на формирование государственных подходов к адаптации к изменениям климата. Федеральным органам исполнительной власти, ответственным за реализацию мероприятий национального плана, поручено утвердить отраслевые планы адаптации к изменениям климата, а высшим исполнительным органам государственной власти субъектов Федерации, ответственным за реализацию мероприятий национального плана, рекомендовано организовать работу по адаптации к изменениям климата и утвердить соответствующие региональные планы.

2. РОЛЬ РОСГИДРОМЕТА В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ

ЗАДАЧИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СЛУЖБ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

Научное обеспечение процесса адаптации к изменениям климата является важнейшей задачей Глобальной Рамочной Основы Климатического Обслуживания (ГРОКО). Концепция ГРОКО состоит в том, чтобы позволить обществу лучше управлять рисками и возможностями, возникающими в результате изменчивости и изменения климата.¹¹ Сфера и направления деятельности ГРОКО охватывают пять приоритетных областей, а именно: сельское хозяйство и продовольственная безопасность, снижение риска бедствий, энергетика, здравоохранение и водные ресурсы.¹²

Согласно рекомендациям ВМО¹³, национальные метеорологические и гидрологические службы (НМГС) могут способствовать решению задач ГРОКО посредством:

- предоставления эффективного и своевременного климатического обслуживания, такого как анализ текущего климата и будущих сценариев изменения климата, оценка уязвимости климата и определение вариантов адаптации, расширение возможностей для планирования и осуществление адаптации и др.;
- установления партнерских отношений между НМГС и научными кругами, правительствами, международными организациями с целью обеспечения более широкого охвата данных и обработки информации, создания и эксплуатации моделей с более высоким разрешением;
- предоставления государственным сельскохозяйственным предприятиям и фермерам информации о погоде и климате, которая может быть особенно полезна при прогнозировании, подготовке и реагировании в короткие сроки на риски для сельского хозяйства или продовольственной безопасности для решения проблем, вызванных экстремальными климатическими явлениями (засухами, экстремальными температурными явлениями), а также долгосрочные риски, связанные с изменением климата, (увеличение частоты циклонов, опустынивание);
- предоставления имеющихся исторических и текущих данных о потерях и ущербе, климатической информации для принятия решений относительно соответствующих уровней инвестиций;
- внедрения, совместно с государственным и частным секторами, комплексных систем раннего предупреждения для значительного сокращения числа

¹¹ См. Бедрицкий А. И., 2020: О разработке национальной платформы климатического обслуживания как российского национального компонента ГРОКО // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 596, с. 7—36 (http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2020/Труды%20ГГО_вып%20596.pdf);

Катцов В. М., 2015: Климатическое обслуживание в Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра. / Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб: Д'АРТ, с. 66—80.

¹² Росгидромет добавляет к этим пяти приоритетам ГРОКО еще два национальных приоритета в области климатического обслуживания: транспорт и строительство.

¹³ Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation. Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process. WMO-№ 1170, 2016, 50 p.

смертельных случаев, вызванных стихийными бедствиями, связанными с погодой, водными ресурсами и климатом, повышения устойчивости общества, поддержания продуктивности и экономического роста и снижения ущерба собственности;

- предоставления информации: а) о погоде и климате, чтобы помочь лицам, принимающим решения в области здравоохранения, улучшить, в частности, понимание механизмов воздействия климата на передачу и возникновение болезней и выявление групп риска, б) о предполагаемых тенденциях изменений климата на ближайшее десятилетие для оценки уязвимости человека и планирования адаптации;
- предоставления рядов климатических данных в поддержку гидрологического моделирования, чтобы дать лучшее понимание воздействия изменчивости климата на наличие водных ресурсов в сроки от сезонов до десятилетий и в пространственных масштабах от местного до регионального для поддержки улучшенного управления водными ресурсами и приоритетного распределения ресурсов для широкого спектра секторов водопотребления, включая городское водоснабжение, ирригационные системы и т. д.;
- предоставления подробной и адаптированной информации о погоде и климате (исторической и прогнозируемой) для первоначальной оценки энергетических ресурсов; разработки кодексов, стандартов и конкретных проектов, для оказания помощи в строительстве и обслуживании инфраструктуры энергосистемы.

В России на национальном уровне решение этих задач в значительной степени опирается на деятельность Росгидромета.

Климатическая доктрина Российской Федерации в числе основных задач политики в области климата называет (ст. 18): *«укрепление и развитие информационной и научной основы политики в области климата, включая усиление научно-технического и технологического потенциала Российской Федерации, обеспечивающего максимальную полноту и достоверность информации о состоянии климатической системы, воздействиях на климат, его происходящих и будущих изменениях и об их последствиях; разработку и реализацию оперативных и долгосрочных мер по адаптации к изменениям климата; разработку и реализацию оперативных и долгосрочных мер по смягчению антропогенного воздействия на климат; участие в инициативах международного сообщества в решении вопросов, связанных с изменениями климата и смежными проблемами».*

В соответствии с перечисленными задачами Росгидромет осуществляет:

- наблюдения за климатической системой на территории Российской Федерации с помощью Государственной наблюдательной сети (ГНС);
- анализ текущего состояния климатической системы — на территории Российской Федерации и в других регионах;
- оценку ожидаемых изменений климата на основе физико-математического моделирования (для разных сценариев внешних воздействий) — на территории Российской Федерации и в других регионах;
- оценку последствий происходящих и ожидаемых изменений климата;
- оценку антропогенных воздействий на климатическую систему;

- участие в разработке адаптационных мероприятий в отношении происходящих и ожидаемых изменений климата;
- участие в международной деятельности, включая как научное сотрудничество, так и обоснование позиции Российской Федерации в международном диалоге по соответствующему кругу вопросов; а также обеспечение «в установленной сфере деятельности выполнения обязательств Российской Федерации по международным договорам Российской Федерации, в том числе по Конвенции Всемирной метеорологической организации, Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Протоколу по охране окружающей среды к Договору об Антарктике, подписанному в г. Мадриде 4 октября 1991 г.»¹⁴

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КЛИМАТОМ

В ведении Росгидромета находится разветвленная система производящих наблюдения станций и пунктов, включающая в себя наземную метеорологическую, аэрологическую, гидрологическую, океанографическую и другие сети. Учреждения Росгидромета участвуют в наблюдениях за криолитзоной и в *космических* исследованиях (см. подробнее раздел 3 «Система наблюдений за состоянием климатической системы»). На ряде станций производится мониторинг основных парниковых газов (углекислого газа, метана, озона), а также других компонентов (окислов азота, окиси углерода и пр.) как в фоновых, так и в городских условиях.

В отличие от многих других видов научно-технической продукции, информация о состоянии климата со временем не устаревает, а, наоборот, ее ценность с годами возрастает. Чем длиннее ряды наблюдений, тем более полезную информацию можно выдать потребителю. Реальную ценность имеют ряды непрерывных наблюдений за многие десятки лет. Разрывы в рядах наблюдений, изменение режима наблюдений значительно понижают потребительскую стоимость информации и создаваемой на её основе информационной продукции. Помимо продолжительности и непрерывности, ключевыми требованиями к климатическим данным являются их однородность, репрезентативность, точность измерений, «прослеживаемость» (метаданные), сопоставимость (однотипность средств измерений).

В условиях постоянного появления новых средств измерений, а также новых и многообещающих систем наблюдений и обработки данных для климатического мониторинга возникает угроза нарушения непрерывности и однородности климатических рядов, если эти новые системы не «вливаются» в действующую ГНС надлежащим образом. В настоящее время — это мировая проблема. Для решения этой проблемы необходимы параллельные наблюдения — для обеспечения однородности климатических рядов (в соответствии с рекомендациями ВМО); развитие метеорологической базы Росгидромета — для обеспечения качества климатического мониторинга; ряд других действий, которые обеспечиваются Росгидрометом.

С целью обеспечения единообразия функционирования вышеупомянутых сетей Росгидрометом выпускаются и регулярно обновляются методические указания, регламентирующие процессы проведения на станциях измерений и наблюдений. Планомерно производятся контроль и сертификация приборов, участвующих в измерениях. Полученные таким образом данные наблюдений в последующем

¹⁴ В соответствии с Положением о Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

собираются и архивируются. В рамках международного сотрудничества значительная часть российских результатов наблюдений передается в международные центры данных для включения их в глобальные массивы данных.

Разнообразие и сложность климатических процессов требуют непрерывного **мониторинга функционирования** и оперативного **методического руководства** ГНС, обеспечения жизнеспособности и технического (включая метрологическое¹⁵) обслуживания ГНС, развития отвечающих мировым стандартам систем анализа и прогнозирования. Указанные требования невыполнимы без **специфических, проблемно ориентированных научных исследований** с непосредственным и безотрывным взаимодействием внутри системы Росгидромета — между научно-исследовательскими учреждениями (НИУ) Росгидромета с одной стороны и территориальными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), а также региональными центрами по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) — с другой.

ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТА

Росгидромет является головным исполнителем Комплексного плана научных исследований погоды и климата (КПНИПК)¹⁶ (п.1 Комплексного плана реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 г.¹⁷, утвержденного Правительством Российской Федерации от 25.04.2011 №730-р). КПНИПК включает широкий спектр исследований погоды и климата – фундаментальных и прикладных (при всей условности границы между ними), включая проблемы интерпретации климатической информации и выработки рекомендаций по ее использованию конечным потребителем (органами власти, отраслями экономики, бизнесом, обществом).

Научные исследования и разработки осуществляются Росгидрометом по всем магистральным и кросс-магистральным направлениям КПНИПК. При этом, в соответствии с изначальным замыслом, результаты исследований и разработок в рамках КПНИПК можно разделить на два вида: (1) приращение знания и новые (или усовершенствованные) технологии, которые используются в науке для совершенствования знания; (2) продукты для применения в практических целях (не только в секторах экономики, но и в политической сфере, в сфере обороны и проч.).

Целевая научно-техническая программа (ЦНТП) Росгидромета «Научно-исследовательские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» в течение последнего десятилетия в соответствующей («климатической») своей части была ориентирована на реализацию КПНИПК и в существенной степени структурирована

¹⁵ В настоящее время эталонная база Росгидромета, хранящаяся в ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» (ГГО), насчитывает более 100 единиц эталонов и поверочного оборудования и включает в свой состав вторичные эталоны атмосферного давления, скорости ветра, энергетической освещенности солнечным излучением, эталоны температуры и относительной влажности воздуха, метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облаков. В ГГО находится региональный эталон ВМО для измерений в атмосфере общего содержания озон, который регулярно сличается с мировым эталоном.

¹⁶ <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/dokumenty/kompleksnyj-plan-nauchnykh-issledovanij-pogody-i-klimata>

¹⁷ <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/kpr.pdf>

в соответствии с его магистральными и кросс-магистральными направлениями. Фактически, «климатическую часть» ЦНТП можно рассматривать как вклад Росгидромета в реализацию КПНИПК.

Важнейшим результатом координируемого Росгидрометом межведомственного взаимодействия в рамках реализации собственно КПНИПК (в рамках кросс-магистрального направления «Гамма. Обслуживание») является информационно-аналитическое обеспечение внешней и внутренней политики Российской Федерации в области климата – в форме **оценочных докладов**, а также ежегодного Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации. К этому же виду обслуживания относится и национальная отчетность в рамках обязательств Российской Федерации по РКИК ООН. Все выпущенные Росгидрометом доклады на регулярной основе направляются в Правительство Российской Федерации, заинтересованные федеральные органы исполнительной власти (ФОИВ), органы власти субъектов Российской Федерации для возможного учета в их практической деятельности.

Целям кросс-магистрального направления «Гамма. Обслуживание» отвечает создание в 2012 г. **Климатического центра Росгидромета** — отраслевого научно-методического центра по организации подготовки (с участием заинтересованных организаций) материалов, содержащих оценки ожидаемых климатических изменений и их последствий, рекомендаций по адаптации к условиям меняющегося климата для органов государственной власти, бизнес-структур, населения; а также по научно-методическому руководству работами учреждений и организаций Росгидромета в области климатического обслуживания (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Климатический центр Росгидромета: электронная база сценарных прогнозов состояния климатической системы на территории России в XXI веке (на основе мультимодельных ансамблей глобальных и региональных климатических моделей), предназначенная для использования в исследованиях будущих климатических воздействий.

Концепция планирования адаптации к изменениям климата, разработанная в 2017 г. совместно экспертами Росгидромета и РАН (см. раздел 1 «Концептуальные основы планирования адаптации»), была принята Минэкономразвития России в качестве основы для разработки проекта НПА.

Следует констатировать, что на «верхнем» уровне — магистральных и кросс-магистральных направлений — КПНИПК до настоящего времени полностью сохраняет свою актуальность. Междисциплинарный характер исследований и разработок, заложенный в КПНИПК отвечает и мировым тенденциям (см., например, новый десятилетний *Стратегический план на 2019—2028 гг. Всемирной программы исследований климата*¹⁸, спонсируемой Всемирной метеорологической организацией, Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО и Международным научным советом). Разделы исследований (второй уровень) КПНИПК на сегодняшний день, по-видимому, нуждаются в уточнении. Однако ожидаемые уточнения КПНИПК по содержанию не представляются радикальными.

Разработка и корректировка адаптационных стратегий для регионов и отраслей экономики должна осуществляться с использованием современных методов, позволяющих учитывать неопределенности сценариев климатических изменений и соответствующих воздействий. Важнейшей составляющей научного обоснования рекомендаций по адаптации являются экономические оценки. При этом необходимо оценивать не только климатические риски, связанные с опасными явлениями, но и риски, обусловленные различными некорректными решениями — например, неадекватным заданием нормативных климатических параметров.¹⁹

В то же время можно утверждать, что российская климатическая наука на сегодняшний день, к сожалению, не входит в состав мировых лидеров. Это обусловлено рядом причин, в том числе — и в весьма значительной степени — **критическим отставанием** отечественной климатической науки в части обеспеченности **суперкомпьютерными ресурсами**. Между тем современные климатические исследования и прогнозы немыслимы без сложных физико-математических моделей, потребляющих огромные вычислительные ресурсы.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ РОСГИДРОМЕТА С РОССИЙСКИМИ ВЕДОМСТВАМИ И РЕГИОНАМИ

Межведомственное взаимодействие Росгидромета осуществляется в рамках государственных программ, а также на хоздоговорной основе. Ярким примером межотраслевого взаимодействия Росгидромета является собственно НПА, в подавляющем большинстве мероприятий которого Росгидромет входит в состав ответственных исполнителей.

Климатическое обслуживание подразумевает тесное сотрудничество климатологов и потребителей, 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). Производители климатической информации должны быть лучше

¹⁸ https://www.wcrp-climate.org/images/documents/WCRP_Strategic_Plan_2019/WCRP-Strategic-Plan-2019-2028-FINAL-c.pdf

¹⁹ Катцов В. М., 2015: Климатическое обслуживание в Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб: Д' АРТ, с. 66—80.

информированы о разнообразии климатически обусловленных решений и об их чувствительности к изменению климатических параметров. В то же время со стороны производителей требуется обеспечить пользователей 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.²⁰

К императивам сегодняшнего дня относится формирование механизмов и модернизация инструментов взаимодействия департаментов, УГМС, ЦГМС, НИУ Росгидромета между собой и с потребителями – отраслевыми и региональными партнерами разного уровня – в рамках научного и информационно-аналитического обеспечения планирования, реализации и мониторинга эффективности адаптации к изменениям климата. При этом одной из ключевых задач департаментов Росгидромета в федеральных округах является усиление и диверсификация работы (с участием УГМС, ЦГМС и НИУ) по информированию региональных органов власти, а также общественности, в том числе через СМИ, о роли, достижениях и климатической продукции Росгидромета в контексте реализации НПА.

Важной функцией Росгидромета является участие (на сегодняшний день недостаточное) в формировании образовательных программ, подготовке и повышении квалификации собственных кадров, задействованных в межведомственном взаимодействии, направленном на климатическое обслуживание, включая совершенствование и реализацию стратегий и планов адаптации к изменениям климата.²¹

ПУБЛИЧНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОСГИДРОМЕТА

Общественность регулярно информируется о состоянии дел в области климата. Выпущены два оценочных доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации²², в которых на основе комплексного анализа специалистами Росгидромета и РАН представлена богатая информация о текущей на момент выхода издания ситуации и ближайших перспективах ее развития. Издаются ежегодные обзоры особенностей климата Федерации и состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации.²³

Оперативные обзоры регулярно публикуются в журнале «Метеорология и гидрология». Для широкого круга читателей-неспециалистов выпускаются научно-популярные издания, посвященные отдельным аспектам проблемы современных изменений климата. Кроме того развивается ряд интернет-сайтов Росгидромета

²⁰ Катцов В. М., 2015: Климатическое обслуживание в Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб: Д' АРТ, с. 66—80.

²¹ См. Блинов В. Г., 2020: Миссия образования в контексте проблемы изменения климата // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 596, с. 37—54 (http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2020/Труды%20ГГО_вып%20596.pdf).

²² Росгидромет, 2008; 2014.

²³ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год, 2020 — М.: Росгидромет 97 с. <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/o-klimat-rf-2019.pdf> (далее — Росгидромет, 2020);

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018 год, 2019 — М.: Росгидромет, 225 с. http://www.meteorf.ru/upload/iblock/41e/Obzor_2018.pdf

(рис. 2.2), включая сайт Климатического центра Росгидромета²⁴ на базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова; Северо-Евразийского Климатического Центра (СЕАКЦ)²⁵ на базе Гидрометцентра России, сайты других подведомственных Росгидромету организаций²⁶. Регулярно выходит электронный бюллетень «Изменение климата» для информирования широкого круга специалистов (НИЦ «Планета»)²⁷.

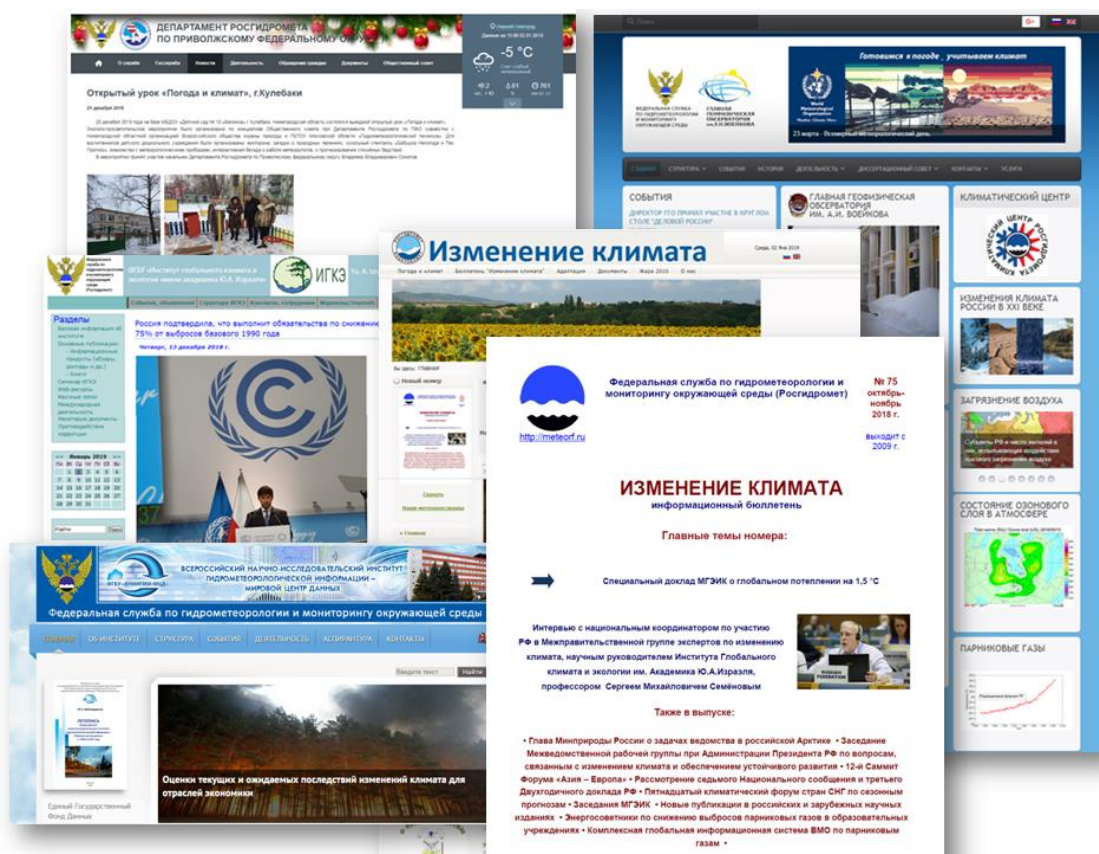


Рис. 2.2. «Климатические окна» подразделений Росгидромета в национальном информационном пространстве.

²⁴ <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/>

²⁵ <http://seakc.meteoinfo.ru>

²⁶ <http://voeikovmgo.ru/?lang=ru>; <http://www.igce.ru>; <http://meteo.ru/egfd>; <http://www.pfo.meteorf.ru>; <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=122>

²⁷ <http://www.global-climate-change.ru>

3. СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КЛИМАТОМ²⁸

МЕСТО ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА КЛИМАТА В СИСТЕМЕ ИНФОРМАЦИОННОГО И НАУЧНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Данные наблюдений за состоянием климатической системы и ее изменениями служат ключевой информационной основой для выработки, практической реализации и оценки результативности государственной климатической политики Российской Федерации в отношении целей и путей, пределов и механизмов адаптации к изменениям климата и снижения ущербов от погодно-климатических воздействий. Эти же данные в их совокупности необходимы для верификации современных (в первую очередь — национальных) физико-математических моделей климата, которые посредством сценарного прогнозирования состояния климатической системы позволяют, в частности, определить важнейшие потребности в упреждающей адаптации²⁹ к возможным в будущем изменениям климата. Тем самым можно с полным основанием утверждать, что *поддержание на надлежащем уровне и всестороннее развитие потенциала³⁰ долгосрочных систематических наблюдений за климатом являются важной задачей обеспечения гидрометеорологической безопасности.*

Статьей 34 Климатической доктрины Российской Федерации установлено, что

«к приоритетным направлениям научного обеспечения разработки мер по адаптации и смягчению антропогенного воздействия на климат относятся: развитие и поддержание на территории Российской Федерации систем наблюдения за климатом, включая факторы, формирующие климат, и индикаторы изменений климата...»

Организационно-технической основой получения данных наблюдений за климатом и его изменениями является система наблюдений, осуществляемых

²⁸ Этот раздел подготовлен на основе доклада Росгидромета «*Переоснащение и модернизация Государственной наблюдательной сети климатического мониторинга*», разработанного в рамках научного и информационного обеспечения реализации НПА. Доклад представляет собой синтез материалов, подготовленных НИУ Росгидромета, отвечающими за научно-методическое руководство производством наблюдений на тематических наблюдательных сетях в составе находящейся в ведении Росгидромета Государственной наблюдательной сети (ГНС). Основополагающими документами для Доклада являются Климатическая доктрина Российской Федерации и Федеральный закон «О гидрометеорологической службе» № 113-ФЗ. При разработке Доклада были использованы документы Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Глобальной системы наблюдения за климатом (ГСНК), определяющие единые для всех наблюдательных систем принципы климатического мониторинга: «Принципы климатического мониторинга Глобальной системы наблюдений за климатом» в публикации «Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО. Дополнение VIII к Техническому регламенту ВМО» (издание 2015 г. обновлено в 2017 г. ВМО-№1160). (https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/Manual-WIGOS-1160_ru.pdf).

²⁹ 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.

³⁰ 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.

с наземных, морских и прибрежных, а также с космических платформ. Учитывая сложность климатической системы, множественность самых разнообразных параметров, за которыми необходимо проводить наблюдения, эти системы построены по принципу тематических наблюдательных сетей. Понятие «наблюдательная сеть» в области гидрометеорологии и смежных с ней областях законодательно определено в статье 1 Федерального закона «О гидрометеорологической службе» (в редакции Федеральных законов от 02.02.2006 № 21-ФЗ, от 21.11.2011 № 331-ФЗ): «Наблюдательная сеть — система стационарных и подвижных пунктов наблюдений, в том числе постов, станций, лабораторий, центров, бюро, обсерваторий, предназначенных для наблюдений за состоянием окружающей среды, физическими и химическими процессами, происходящими в окружающей среде, определения ее метеорологических, климатических, аэрологических, гидрологических, океанологических, гелиогеофизических, агрометеорологических характеристик, а также для определения уровня загрязнения атмосферного воздуха, почв, водных объектов, в том числе по гидробиологическим показателям, и околоземного космического пространства». В редакции Федерального закона от 22.08.2004 № 122-ФЗ Государственная наблюдательная сеть (далее ГНС) — это «наблюдательная сеть федерального органа исполнительной власти в области гидрометеорологии и смежных с ней областях».

Росгидромет ведет регулярный мониторинг изменений климата и текущих климатических аномалий для Земного шара, территории Российской Федерации и ее регионов. Основные информационные продукты мониторинга: ежегодный *Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации*; годовые и сезонные бюллетени мониторинга климата; материалы для ежегодных Заявлений ВМО о состоянии климата; обзоры, научные публикации, справки по запросам министерств и ведомств и др. По линии СНГ: подготовка ежегодного Сводного сообщения о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ (по данным, полученным от национальных гидрометеослужб).

Важнейшим информационно-аналитическим продуктом Росгидромета, использующим данные мониторинга климата, является «*Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*» (2008, 2014 г.).³¹ Подготовка очередного — Третьего оценочного доклада этой серии предусмотрена Национальным планом мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года (мероприятие 15 приложения к распоряжению Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р).

Информационно-аналитическая продукция Росгидромета послужила основой для Климатической доктрины Российской Федерации, а также собственно Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, концепция которого для Минэкономразвития была разработана специалистами Росгидромета и РАН в 2017 г.

Росгидромет осуществляет участие в международной деятельности, включая как научное сотрудничество, так и обоснование позиции Российской Федерации в международном диалоге по соответствующему кругу вопросов; а также обеспечение «в установленной сфере деятельности выполнения обязательств Российской Федерации по международным договорам Российской Федерации, в том числе

³¹ <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52>

по Конвенции Всемирной метеорологической организации, рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Протоколу по охране окружающей среды к Договору об Антарктике, подписанному в г. Мадриде 4 октября 1991 г.»³²

ТРЕБОВАНИЯ К НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА КЛИМАТОМ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯМИ

В 1992 г. по рекомендациям Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) была создана совместная с ВМО, Межправительственной океанографической комиссией (МОК/IOC) ООН по вопросам образования, науки и культуры, Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП/UNEP) и Международным советом по науке (MCHC/ICSU) программа «Глобальная система наблюдений за климатом/Global Climate Observing System» (ГСНК/GCOS). Цель создания ГСНК заключалась в организации долговременной системы наблюдений за глобальным климатом, опирающейся на уже существующие национальные системы наблюдений за атмосферой, океаном и поверхностью суши.

ГСНК призвана предоставлять правительствам и научному сообществу всеобъемлющую информацию обо всей климатической системе, включающую ряд физических, химических и биологических параметров и характеристик.³³ В состав ГСНК включены три основные глобальные составляющие: приземная климатическая наблюдательная сеть (ПСГ), аэрологическая сеть (ГУАН) и морские наблюдения. ГСНК состоит, примерно, из 1000 климатических станций ПСГ, по возможности равномерно распределенных на суше (из расчета: 1 станция на 250 000 км²) и около 160 аэрологических станций ГУАН.

В целях обеспечения высокого качества климатической информации и ее сопоставимости в глобальном масштабе ГСНК вырабатывает единые для всех наблюдательных систем принципы климатического мониторинга.

Основными специфическими требованиями к служащим основой для оценки изменения климата наблюдениям, сформулированными в документах ВМО, являются:

- *Продолжительность* временных рядов данных, достаточная для анализа изменений климата на временных масштабах от нескольких десятилетий и более (желательно наличие рядов с начала 1950-х гг. или ранее).
- *Репрезентативность* пункта наблюдений относительно общего фона климатообразующих и других природных факторов.
- *Однородность* временных рядов данных, отсутствие в них разрывов, обусловленных изменением методов измерений и обработки данных, переносом или потерей репрезентативности станции на протяжении периода наблюдений.³⁴

³² В соответствии с Положением о Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

³³ ГСНК введен перечень «основных климатических характеристик (переменных)» (ECV): GCOS-82, 2003. The Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC, WMO/TD-№ 1143, 73 p.

³⁴ Для климатических исследований изменение методов и методик наблюдений, включая приборное оснащение, интервалы измерений, размещение приборов, а также обработки данных могут стать серьезной проблемой. Поэтому при переходе на новые средства и/или методы наблюдений следует в обязательном порядке предусматривать проведение в течение определенного периода параллельных наблюдений. Рекомендации по продолжительности параллельных наблюдений в зависимости от наблюдаемого параметра содержатся в документах ВМО.

- *Однородность окружающей среды* в непосредственной близости от пункта наблюдения на протяжении периода наблюдений.³⁵
- *Сопоставимость данных наблюдений* на всем пространстве страны и сопоставимость российских данных наблюдений с данными аналогичных международных наблюдательных сетей.³⁶
- *Высокое качество данных наблюдений*, соответствующее стандартам ВМО, поскольку климатические изменения характеристик атмосферы (изменения статистики погоды) происходят медленно, и чтобы обнаружить сигнал изменений, необходимо располагать специальным образом сформированной системой управления качеством — от выполнения измерений до получения конечного информационного продукта.³⁷

Для адекватной оценки состояния и изменений климата в глобальном и региональном масштабах, особенно в потенциально уязвимых регионах, сеть наблюдений должна быть достаточно плотной. Для более подробного описания климатических процессов на всех пространственных масштабах — от планетарного до локального — в соответствии с поручением XIII конгресса ВМО, в дополнение к сетям ГСНК были созданы Региональные опорные климатические сети (РОКС) с большей плотностью климатических станций. При этом потребности национальных климатических сетей определяются каждой страной-членом ВМО с учетом ее собственных интересов.

КЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЙ ГНС

В Российской Федерации федеральным законом №113-ФЗ установлена правовая норма, позволяющая юридическим и физическим лицам осуществлять наблюдения за климатом и его изменениями на основании лицензии Росгидромета. Однако более чем двадцатилетнее практическое применение этой нормы показало, что, как правило, наблюдения, выполняемые лицензиатами, вышеперечисленным требованиям не удовлетворяют, а получаемые ими данные для мониторинга климата не пригодны. Поэтому основным объектом развития сетей наблюдения за климатом и его изменениями является и должна оставаться в будущем государственная наблюдательная сеть (ГНС) — наблюдательная сеть Росгидромета, состоящая из тематических наблюдательных сетей.

Согласно рекомендациям ВМО, в составе ГНС выделяются три типа сетей наблюдательных климатических станций: глобальная, региональная и национальная климатические сети. Сети должны быть взаимосвязанными: каждая станция глобальной сети должна являться частью региональной (территория России расположена в двух регионах: PA-VI (Европа) и PA-II (Азия)) и национальной сетей.

³⁵ Именно этот принцип лежит в основе законодательного требования (см. пункт 3 статьи 13 Федерального закона № 113-ФЗ) о создании охранных зон пунктов наблюдения.

³⁶ Это требование вытекает из необходимости глобальных оценок климата и его изменений. Оно отвечает глобальному принципу взаимности в обеспечении обмена данными наблюдений, который был выдвинут еще основателем метеорологической службы России академиком А. Я. Купфером.

³⁷ Рекомендации по вопросам создания и надлежащего функционирования системы управления качеством содержатся в документах ВМО и ИСО.

Важнейшими компонентами системы наблюдений за климатическими изменениями в составе ГНС являются наземная метеорологическая, аэрологическая, гидрологическая, морская гидрометеорологическая наблюдательные сети, сети мониторинга химического состава и отдельных характеристик атмосферы в рамках Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО (см. Приложение 1). Уровень развития наземных наблюдений за криолитозоной, отдельными климатически значимыми компонентами состава атмосферы (например, за так называемыми короткоживущими климатическими загрязнителями — черным углеродом и др.), некоторыми другими климатическими характеристиками и индикаторами изменения климата в настоящее время не достигает минимально необходимого. Учитывая обширность территории, а также «глобальный характер интересов Российской Федерации в отношении изменений климата и их последствий»³⁸, особое место занимают спутниковые наблюдения за различными компонентами климатической системы. Спутниковые наблюдения используются, в частности, при мониторинге облачности, криосферы (в том числе, в горных районах), биосферы, состояния гидрологических объектов и прибрежных территорий. Спутниковые наблюдения требуют тщательной калибровки по наземным наблюдениям, поскольку не являются прямыми измерениями климатических переменных, а восстанавливаются по косвенным данным с использованием сложных алгоритмов.

Благодаря размерам охватываемой территории российская система наблюдений за климатом является важной частью общемирового климатического мониторинга. Основная роль в получении и анализе данных с российской территории принадлежит Росгидромету, в ведении которого находится ГНС. Важно отметить, что климатический мониторинг обеспечивается лишь частью ГНС. Остальная часть ГНС решает иные задачи, возложенные на Росгидромет в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды, включая ее загрязнение.

Количественный состав ключевых компонентов российской системы наблюдений за климатом, находящейся в ведении Росгидромета, следующий:

- национальная климатическая наземная метеорологическая сеть состоит из 775 длиннорядных репрезентативных станций (132 из них являются станциями ГСНК), выполняющих различные программы метеорологических и актинометрических наблюдений;
- 14 станций (две из которых расположены в Антарктиде) с аэрологическими наблюдениями, представляющие минимальную конфигурацию станций ГСНК;
- 1262 реперных гидрологических поста, выполняющих гидрологические наблюдения по различным стандартным и специализированным программам;
- 88 реперных наблюдательных подразделений с морскими климатическими наблюдениями, расположенных в открытых акваториях и прибрежных районах (из них 14 пунктов входят в состав глобальной системы наблюдений за уровнем моря);
- климатический мониторинг химического состава атмосферы: 4 станции, выполняющие измерения концентраций парниковых газов; 10 станций, осуществляющих наблюдения за химическим составом и кислотностью осадков; 28 станций наблюдений за озоновым слоем Земли (общим содержанием озона) и др.

³⁸ Ст.7 Климатической доктрины Российской Федерации.

В течение последних десятилетий, прежде всего, в связи с проблемами бюджетного финансирования, наблюдается устойчивая тенденция к сокращению количества пунктов климатических наблюдений и уменьшению объемов и программ наблюдений на ГНС.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ФИНАНСОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КЛИМАТОМ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯМИ

Развитие сети наблюдений за климатом и его изменениями является одним из приоритетов Климатической доктрины Российской Федерации и одним из важных мероприятий НПА.

Развитие климатических наблюдений в рамках ГНС подразумевает как *поддержание и модернизацию ее существующих компонентов, восстановление компонентов, утраченных в последние десятилетия, так и создание новых* с соблюдением приведенных выше требований ГСНК.

Разнообразие и сложность климатических процессов требуют *непрерывного мониторинга функционирования и оперативного методического руководства ГНС, обеспечения жизнеспособности, технического (включая метрологического) обслуживания, модернизации наблюдательной сети (в т. ч. автоматизированной)*. Указанные требования невыполнимы без специфических, проблемно ориентированных прикладных научных исследований, проводимых с непосредственным и непрерывным взаимодействием между НИУ и оперативными подразделениями Росгидромета.

Устойчивое и непрерывное функционирование климатической сети, а также получение с пунктов наблюдений достоверной первичной информации можно обеспечить только при выполнении следующих *организационных требований*:

- регулярное плановое обновление парка средств измерений, выработавших свой ресурс, и их централизованная техническая поддержка путем создания обменного фонда средств измерений и оборудования;
- организационно-техническое и финансовое обеспечение метрологического обслуживания средств измерений;
- автоматизация измерений визуально определяемых в настоящее время метеорологических, гидрологических и др. характеристик;
- развитие методов усвоения, передачи и обработки результатов наблюдений климатической сети;
- кадровое усиление всех технологических звеньев службы;
- создание необходимой инфраструктуры для наблюдений;
- сохранение репрезентативности пунктов наблюдений;³⁹
- восстановление ранее закрытых климатических станций.⁴⁰

³⁹ В частности, обеспечение неизменности ближайшего окружения пунктов метеонаблюдений, для чего необходимо на законодательном уровне утвердить разработанный проект постановления Правительства РФ об утверждении «Положения об охранных зонах стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением».

⁴⁰ В частности, ГСНК и РОКС с метеорологической и актинометрической программами наблюдений, а также с наблюдениями за составом атмосферы.

Для эффективного развития наблюдательных систем в целях наблюдения за климатом необходимо обеспечить первоочередное выполнение следующих *организационных мер*:

- исследование влияния внедрения нового оборудования или изменения в существующих системах наблюдений на результаты климатического мониторинга, которое следует проводить до их внедрения на сети;
- проведение параллельных наблюдений с применением новых и штатных систем измерений;
- систематизация и периодическое обновление метаданных станций (детали и история локальных изменений, описание приборов, технологических процессов и др.);
- регулярная проверка и оценка качества и однородности результатов наблюдений как неотъемлемая часть обработки данных измерений;
- сохранение функционирования длиннорядных станций с непрерывными рядами наблюдений (чем длиннее ряд наблюдений, тем выше ценность станции);
- повышение эффективности управления ГНС, в том числе за счет внедрения автоматизированных и цифровых методов и технологий;
- особое внимание к регионам с низкой плотностью станций и недостаточным объемом данных (прежде всего, в Арктике и на северо-востоке страны);
- разработка стратегий организации в рамках ГНС наблюдений за характеристиками, уровень мониторинга которых в настоящее время не достигает минимально необходимого.

Вопросы восстановления состава, капитального ремонта инфраструктуры, технического оснащения и регулярного переоснащения, а также модернизации и развития наблюдательной климатической сети должны рассматриваться комплексно и решаться планомерно с учетом анализа результатов непрерывного мониторинга состояния и функционирования наблюдательных подразделений ГНС, анализа новых отечественных и зарубежных технологий получения, сбора, передачи, хранения представления климатической и связанной с ней информации, необходимой для решения научно-технических, экономических, военно-стратегических и других текущих и вновь возникающих задач в области климата.

В связи с тем, что основным потребителем информационной продукции климатического мониторинга является Российская Федерация (в том числе в части выполнения международных обязательств), в ведении которой находится гидрометеорологическая служба, источником финансирования мероприятий работ по развитию климатического мониторинга, по мнению Росгидромета, должен быть *Федеральный бюджет Российской Федерации*.

Указанные мероприятия целесообразно включать в действующую государственную программу «Охрана окружающей среды». В тоже время, в качестве финансовых механизмов развития системы климатического мониторинга в части технического оснащения целесообразно использовать положительный опыт централизованного технического переоснащения ГНС в рамках первого и второго проектов «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета». Многолетний опыт показывает, что этот механизм позволяет

в приемлемой степени обеспечить требования Росгидромета к качеству закупаемого оборудования, а также привлечение займов международных организаций.

Что касается средств заинтересованных организаций (госкорпорации, банки, страховой бизнес и т. п.), то возможности их привлечения для развития ГНС климатического мониторинга (в т. ч. в форме *частно-государственного партнерства*) на сегодняшний день нуждаются в детальной проработке и дальнейшей поэтапной реализации. Это в определенной мере отвечает и формируемой в настоящее время стратегической идеологии ВМО, содержащей положения о развитии партнерства по различным направлениям своей деятельности с заинтересованными организациями, включая частный сектор.

Имеют перспективу *межведомственные взаимодействия Росгидромета*, например, с госкорпорацией «Роскосмос» (спутниковые наблюдения). Новые возможности подобного взаимодействия открываются, в частности, в рамках реализации «Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года».

При этом возможное в отдельных случаях финансирование со стороны *субъектов Российской Федерации* (например, мониторинг криолитозоны, черного углерода) — потенциально существенный, но недостаточный механизм, поскольку основная задача наблюдений за климатом имеет федеральное значение; подключение региональных бюджетов можно ожидать на цели детализации оценок локальных изменений климата в интересах конкретного субъекта Российской Федерации.

Развитие ГНС в части климатического мониторинга является *непрерывным многовекторным процессом*, приоритеты которого регулярно актуализируются в зависимости от объемов доступного финансирования и по мере решения текущих задач. Соответственно, финансирование развития климатического мониторинга (как и обеспечения его устойчивого функционирования) не может быть разовой акцией, но должно стать постоянной составляющей бюджета Российской Федерации.

4. ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИЗЕМНОГО КЛИМАТА⁴¹

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В новом докладе⁴², подготовленном Всемирной метеорологической организацией и широкой сетью партнеров, подтверждается, что 2019 год стал вторым самым теплым годом за всю историю инструментальных наблюдений. Пять лет с 2015 по 2019 гг. и десять лет с 2010 по 2019 гг. стали самыми теплыми за всю историю наблюдений. Начиная с 1980-х гг. каждое последующее десятилетие было более теплым, чем любое предыдущее. 2019 год завершился при средней глобальной температуре на 1,1 °C выше расчетных доиндустриальных уровней, уступая лишь рекордному показателю, установленному в 2016 г., когда очень мощное явление Эль-Ниньо способствовало повышению средней глобальной температуры сверх общей тенденции потепления.

В 2019 г. концентрация основных антропогенных долгоживущих парниковых газов: углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) достигла очередных максимумов. Среднеглобальная средняя годовая концентрация, рассчитанная по результатам наблюдений на фоновых морских станциях, составила для углекислого газа $409,8 \pm 0,1$ млн⁻¹, а для метана — $1866,6 \pm 0,9$ млрд⁻¹. За период с 1984 по 2019 гг. концентрация CO₂ ежегодно увеличивалась в среднем на $1,9 \pm 0,6$ млн⁻¹, а ежегодный прирост CH₄ составил $6,5 \pm 4,6$ млрд⁻¹.⁴³ В целом за указанный период средняя глобальная концентрация CO₂ увеличилась на 19,1, а CH₄ на 13,5 %. При этом содержание углекислого газа в атмосфере увеличивалось равномерно, а содержание метана в 1999—2006 гг. оставалось почти неизменным и лишь затем стало монотонно расти (рис. 4.1).

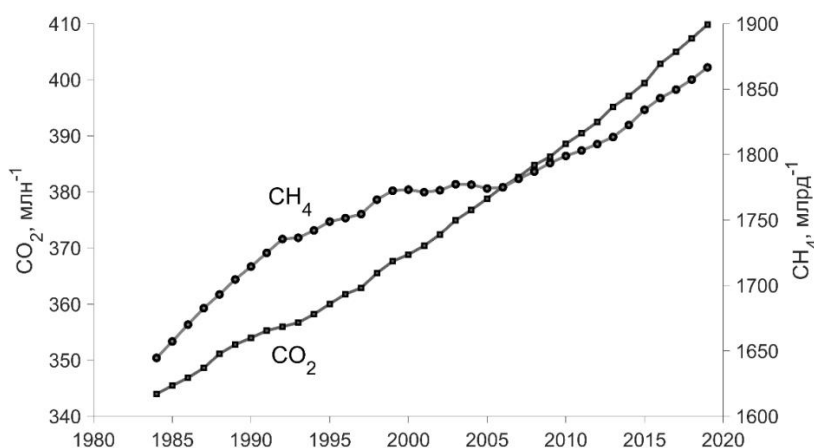


Рис. 4.1 Эволюция средней глобальной средней годовой концентрации CO₂ и CH₄ за период 1975—2018 гг.

⁴¹ Этот раздел подготовлен, в основном, на основе публикаций: Росгидромет (2014), Росгидромет (2020) — М.: Росгидромет 97 с. <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/o-klimate-rf-2019.pdf>, а также Заявление о состоянии глобального климата в 2019 году (2020) — ВМО, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211).

⁴² Заявление о состоянии глобального климата в 2019 году (2020) — ВМО, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211

⁴³ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Более 90 % избыточной энергии, аккумулируемой в климатической системе в результате увеличения концентрации парниковых газов, поступает в океан. В 2019 г. теплосодержание океана до глубины двух километров превысило предыдущие рекордные уровни, установленные в 2018 г. Потепление океана оказывает широкомасштабное воздействие на климатическую систему. Оно изменяет океанические течения и косвенно влияет на траектории циклонов и таяние плавучих шельфовых ледников. Наряду с закислением и деоксигенацией потепление океана может привести к резким изменениям в морских экосистемах. В течение десятилетия 2009—2018 гг. океан поглотил около 23 % ежегодных выбросов CO₂, что смягчает воздействия изменения климата, но повышает кислотность океана. Изменение концентрации ионов водорода (pH) снижает способность таких морских организмов, как мидии, ракообразные и кораллы, к кальцификации, влияя на морскую флору и фауну, их рост и воспроизводство. Данные наблюдений и моделей свидетельствуют о снижении содержания кислорода в открытых и прибрежных океанах, включая эстуарии и полузакрытые моря. Согласно оценкам, запасы кислорода в мировом океане сократились с середины прошлого столетия на 1—2 % (то есть на 77—145 млрд т).

Уровень моря повышался в течение всего периода спутниковых альтиметрических измерений (с 1993 г.), однако темпы его повышения со временем росли, главным образом за счет таяния ледниковых щитов в Гренландии и Антарктике. В 2019 г. глобальный средний уровень моря достиг своего рекордного значения за всю историю наблюдений.

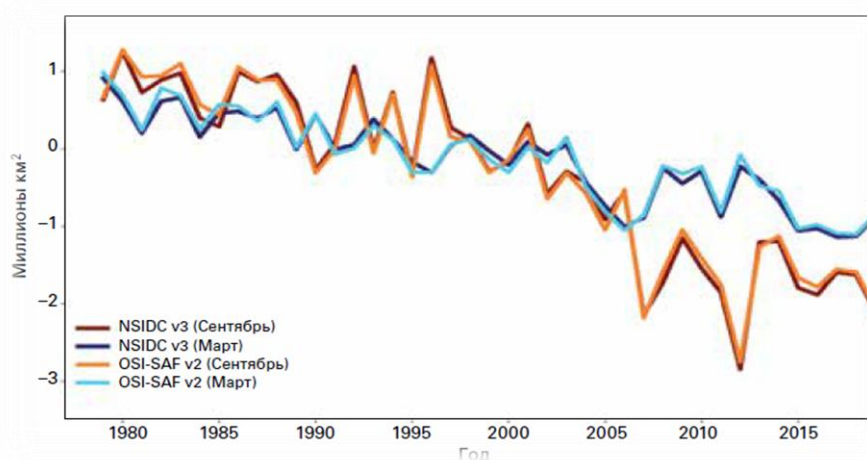


Рис. 4.2. Аномалии площади льда в марте и сентябре в период с 1979 по 2019 гг.

Аномалия для каждого года определена как отклонение площади льда (млн км²) от среднего за период 1981—2010 гг. значения для соответствующего месяца.⁴⁴

Март — площадь льда максимальна, **сентябрь** — площадь льда минимальна.

Продолжается сокращение морского ледяного покрова в Арктике — особенно быстрое в сезонном минимуме: по данным спутниковых наблюдений (с 1979 по 2019 гг.) сокращение площади льда в сентябре составило 12,9 % за десятилетие (рис. 4.2). С 1958 г. арктический морской ледяной покров потерял в среднем около двух третей своей толщины, и теперь 70 % морской ледяной шапки

⁴⁴ US National Snow and Ice Data Center (NSIDC) and EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI-SAF).

состоит из сезонного льда или льда, который образуется и тает в течение одного года.⁴⁵

В Антарктике до 2016 г. наблюдалось небольшое увеличение морского ледяного покрова. В конце 2016 г. эта тенденция была прервана в результате резкого снижения его протяженности до экстремально низких значений. С тех пор площадь морского льда в Антарктике остается относительно небольшой.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

На территории России в последние годы, в основном, сохранялись тенденции в изменениях климата, описанные в оценочных докладах Росгидромета, опубликованных в 2008 и 2014 г.⁴⁶

Ввиду большого (~100 лет) «времени жизни» CO_2 в атмосфере, измерения концентрации углекислого газа над российской территорией показывают практически идентичные средним глобальным темпам роста. Содержание метана в атмосфере над Россией также увеличивается, но оно существенно зависит от интенсивности местных источников (рис. 4.3).

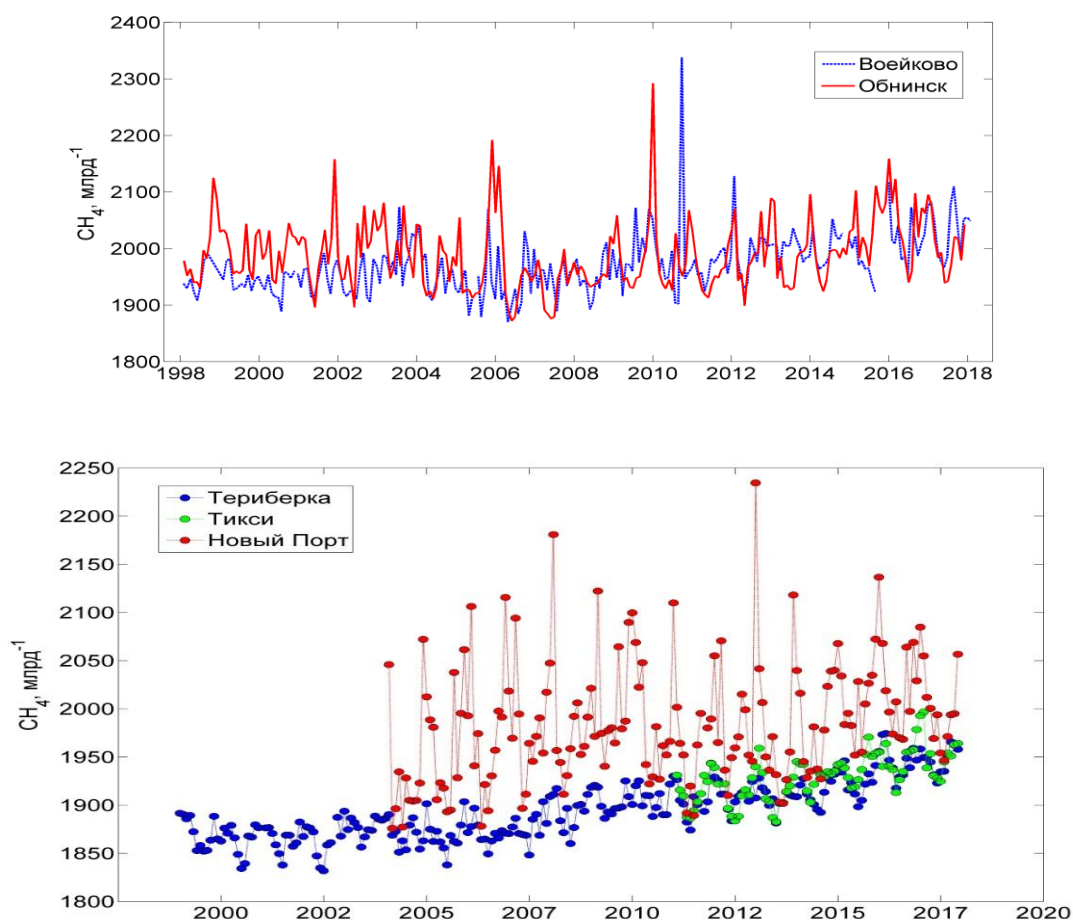


Рис. 4.3 Средняя месячная концентрация метана (млрд⁻¹) в приземном воздухе по данным измерений в 1998—2018 гг. на станциях Обнинск и Воейково (вверху) и на трех российских арктических станциях (внизу).

⁴⁵ Perovich D., Meier W., Tschudi M., Farrell S., Hendricks S., Gerland S., Haas C., Krumpen T., Polashenski C., Ricker R., Webster M., 2018: Arctic Report Card: Update for 2018. Sea Ice. <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/780/Seanbsplce>

⁴⁶ Росгидромет, 2008; 2014.

Результаты измерений на станциях Териберка и Тикси соответствуют фоновым «незагрязненным» значениям и хорошо согласуются с данными ряда зарубежных станций. В данных измерений в Обнинске и Воейково присутствует составляющая, обусловленная близостью этих станций к крупным городам. Значительное превышение концентраций на станции Новый Порт над фоновыми связано с ее расположением в районе газо- и нефтедобычи.

Темпы потепления на территории России с середины 1970-х гг., примерно, в 2,5 раза превосходят среднеглобальные (рис. 4.4).⁴⁷ Наибольшая скорость прироста температуры имеет место в высоких широтах. Потеплению подвержена вся территория России как в целом за год, так и во все сезоны. Наиболее интенсивный рост температуры наблюдается весной (0,63 °C/10 лет), летом и осенью он составляет 0,39 °C/10 лет и 0,43 °C/10 лет соответственно. Зимой средний по территории России тренд (0,39 °C/10 лет) незначим на 1 %-м уровне (как и для большинства регионов России). В Сибири зимой наблюдается область похолодания, впервые проявившаяся в период 1976—2010 гг. и достигшая максимума в период 1976—2014 гг., когда похолодание охватывало большую часть Западной и юг Средней Сибири и достигало в центре –0,54 °C/10 лет; в настоящее время похолодание менее выражено (–0,4 °C/10 лет на юге Западной Сибири). Рост зимней температуры для России в целом прекратился в середине 1990-х годов, после чего наблюдалось ее убывание; в последние шесть-семь лет наметилась тенденция к росту.

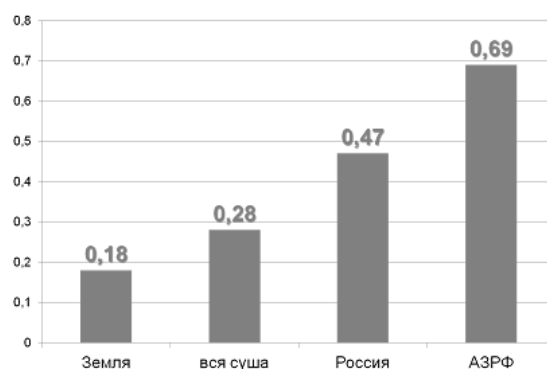


Рис. 4.4 Средняя скорость роста температуры приземного воздуха за десятилетие (°C/10 лет): над всей поверхностью планеты, только над сушей, над территорией России и над арктической зоной Российской Федерации (АЗРФ) за период 1976—2019 гг.

В целом на территории России преобладает тенденция к увеличению годовых сумм осадков. В среднем за период 1976—2019 гг. оно составляет 2,2 %/10 лет (при вкладе в дисперсию 35 %, таким образом, тренд статистически значим на уровне 1 %).⁴⁸ Тренд превышает 5 %/10 лет лишь в ряде областей Сибири и Дальнего Востока и в Северо-Кавказском Федеральном округе. Убывают осадки на севере Чукотского АО. Незначительное убывание наблюдается в центральных районах ЕЧР. В среднем по территории России наибольшее увеличение осадков отмечается весной (5,7 %/10 лет), а наименьшее — летом (0,7 %/10 лет). Зимой и осенью коэффициент линейного тренда равен, соответственно, 2,5 %/10 лет и 1,7 %/10 лет.

⁴⁷ Росгидромет, 2020.

⁴⁸ Существуют различные подходы к анализу (корректировке) данных наблюдений за осадками, особенно твердыми, до сих пор остающиеся предметом дискуссий среди специалистов (см. Росгидромет, 2014). В этом разделе приведены оценки, полученные в ФГБУ «ИГКЭ» (Росгидромет, 2020).

За период 1976—2019 гг. в среднем по России максимальная высота снежного покрова увеличивалась на 1,72 см/10 лет (тренд значим на 5 %-м уровне).⁴⁹ За тот же период наблюдается сокращение продолжительности залегания снежного покрова, в среднем по России оно составляет –1,01 дня за 10 лет. По данным маршрутных снегосъемок для территории страны в целом средний запас воды в снеге на открытой местности (в поле) увеличивается на 2,53 мм за 10 лет, а в лесу уменьшается на 1,45 мм за 10 лет. В лесах России преобладают тенденции уменьшения максимального за зиму запаса воды в снеге.

В последние десятилетия на многих участках криолитозоны происходит рост температуры верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов, а в отдельных регионах отмечается увеличение глубины сезонного протаивания.⁵⁰

Годовой сток большинства крупнейших рек России в последнее тридцатилетие в среднем выше, чем в предшествующее.⁵¹ Значительно увеличилась водность Волги, а также крупных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Основной причиной увеличения стока рек зимой на ЕЧР, по-видимому, является рост как количества осадков, так и повторяемости зимних оттепелей. В Приморье и на Северном Кавказе увеличиваются частота и рост высоких уровней воды при дождевых паводках. Возрастают также частота и мощность наводнений, обусловленных заторами льда на реках Восточной Сибири.

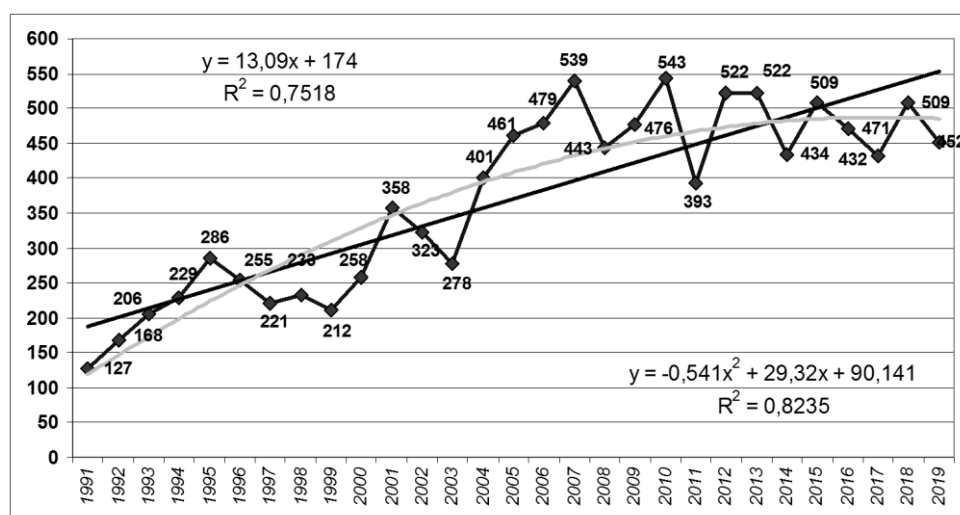


Рис. 4.5 Суммарное число опасных явлений и комплексов неблагоприятных явлений, нанесших социальный и экономический ущерб.⁵²

⁴⁹ Росгидромет, 2020.

⁵⁰ Росгидромет, 2020.

⁵¹ Росгидромет, 2017.

⁵² Шамин С. И., Бухонова Л. К., Санина А. Т. — «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»: <http://meteo.ru/data/310-neblagopriyatnye-usloviya-pogody-nanjosshie-ekonomicheskie-poteri>). См. также Шамин С. И., Санина А. Т., 2018. 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., 2019. Оценка частоты появления опасных гидрометеорологических явлений, нанесших ущерб субъектам Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 184, с. 54—66.

По данным международных страховых агентств, начиная с 1980 г., общее ежегодное число природных катаклизмов в мире увеличилось примерно в три раза, причем основной вклад в это увеличение вносят ветровые нагрузки (штормы, ураганы, торнадо, смерчи и пр.) и изменения в гидрологическом режиме (наводнения, паводки и др.). В России количество опасных погодных явлений, наносящих существенный ущерб, также возрастает (рис. 4.5).

5. НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОНОМИКУ И НАСЕЛЕНИЕ

Региональные изменения средних значений климатических характеристик, обусловленные глобальным изменением климата, могут сопровождаться нарастанием изменчивости погодных условий, так называемой «нервозности климата», — увеличением числа экстремальных (аномальных) погодных явлений. Воздействия, связанные с экстремальными явлениями, такими как волны тепла, засухи, паводки, циклоны и стихийные пожары, вызывают нарушение производства продовольствия и водоснабжения, причиняют ущерб инфраструктуре, повышают уровень заболеваемости и смертности. Эти воздействия выявляют значительную уязвимость и подверженность ряда экологических и антропогенных систем текущей изменчивости климата с «весьма высокой степенью достоверности»⁵³.

Отличительной особенностью современной климатической системы является тот факт, что при сравнительно небольших по величине изменений средних значений мы наблюдаем значительные изменения статистики экстремумов.⁵⁴ С точки зрения влияния изменчивости климата на экономику и население страны, наиболее интересны два типа экстремальных явлений: кратковременные аномалии, превосходящие определенные пороговые значения (сильная жара/холод, ливень и т. д.), и длительные эпизоды, в течение которых метеорологическая переменная или комплекс переменных выходит за заданный уровень: волны тепла и холода, засухи и т. д.

Экстремальные явления погоды (наводнения, сильный ветер, засухи и т. д.) требуют повышенного внимания из-за негативного и во многих случаях катастрофического характера воздействия на природные и техногенные системы. С середины 1990-х гг. на территории России наблюдалось значительное увеличение числа опасных явлений, нанесящих значительный ущерб экономике и населению (рис. 4.5). При этом, опасные явления погоды (ОЯ), стали более интенсивными и разрушительными, чем ранее, и повлекли за собой техногенные чрезвычайные ситуации. В России, ежегодный ущерб от воздействия опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды на территории России составляет не менее 30—60 млрд рублей в год.⁵⁵

На территории России опасные гидрометеорологические явления отмечаются фактически ежесуточно. Наиболее часто опасные явления наблюдаются в Северо-

⁵³ IPCC, 2014.

⁵⁴ Росгидромет, 2014.

⁵⁵ Коршунов А. А., Шаймарданов М. З., Шаймарданова И. Л., 2010: Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие экономики России для обслуживания потребителей: результаты статистического анализа опасных условий погоды // Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 174. См. также Оганесян В. В., Стерин М. А., 2019: Расчет потенциального финансового ущерба от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации в 1987—2017 гг. // Метеорология и гидрология, № 12, с. 97—108.

Кавказском регионе, Читинской обл., Алтайском крае, Кемеровской области. Более 70 % ОЯ приходится на теплый период (апрель—октябрь) года.

Чрезвычайные ситуации (ЧС) природного характера — такие, как сильные разливы рек, прорывы дамб и плотин, крупные нарушения энергоснабжения, торфяные пожары и т. д. — связаны с опасными метеорологическими природными явлениями, среди которых наиболее разрушительными являются сильные ветры, сильные дожди и др. (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Рейтинг опасных явлений, вызвавших чрезвычайную ситуацию по регионам России:
от наибольшего (1) к наименьшему (5) ущербу

Регион	Сильные ветры	Сильные снегопады	Сильные метели	Сильные дожди	Сильные заморозки	Сильный гололед	Сильные морозы	Сильная засуха	Градобиения
Северо-Западный	1	3	4	1			2		
Центральный	2	3	5		5		4		
Поволжье	1					2			
Северный Кавказ	2	3				4			5
Урал	1		2	3					
Западная Сибирь		1	4	3				2	
Восточная Сибирь	4		1	3			2		
Забайкалье	2	4		1				3	
Дальний Восток	2	3	4	1			5		

Для всех регионов, кроме Западной Сибири, наибольшую опасность представляют сильные ветры. С этим ОЯ связано 27% ЧС. Они же наносят и самый большой ущерб, так как развиваются очень быстро и неожиданно, их почти невозможно прогнозировать и, соответственно, к ним трудно заранее подготовиться. Скорости ветра, соответствующие критерию ОЯ, отмечаются чаще в теплый период, и имеют характер шквалов. В переходные сезоны и зимой случаи усиления ветра до критерия ОЯ связаны с увеличением барического градиента или же с местными ветрами (Новороссийская бора, Новоземельская бора и пр.).

При наблюдаемом снижении средних скоростей ветра сильные ветры, которые формируют ветровую нагрузку на здания и сооружения, не уменьшаются на большей части территории России. Например, в Центрально-Черноземных районах в 2001 г. отмечалась скорость ветра 28 м/с — максимальная за весь период наблюдений.⁵⁶ В Москве, начиная с 2008 г., сильные ветры стали отмечаться ежегодно, а в 2010, 2012 и 2015 гг. по несколько раз за лето, неся с собой гибель и травмы людей, повреждения

⁵⁶ База данных ВНИИГМИ-МЦД «Доступ к данным. Неблагоприятные условия погоды, нанесение экономических потерь» <http://meteo.ru/data/310-neblagopriyatnye-usloviya-pogody-nanjosshie-ekonomicheskie-poteri>

домов, разрыв линий электропередач, отключение электричества. Наиболее уязвимыми к сильным ветрам являются энергетика, ЖКХ и транспорт.⁵⁷

Говоря об уязвимости секторов экономики, нельзя забывать об уязвимости населения. Ущерб, наносимые погодными явлениями, зачастую связаны с травматизмом или даже гибелью людей, а также стрессами, в том числе вследствие потери близких и имущества.⁵⁸ Кроме того, говоря об ущербе для населения от ОЯ, следует принимать во внимание ценность человеческой жизни в России. По оценке, основанной на методе актуарных расчетов, так называемая стоимость среднестатистической жизни («value of statistical life») в 2019 г. составляла 9 млн руб.⁵⁹

На территории России наблюдается относительный рост числа случаев с осадками, нанесшими значительный ущерб экономике и населению. Среди таких осадков (сильный дождь, продолжительный дождь, сильный ливень) преобладает вклад сильных дождей с выпадением не менее 50 мм жидких или смешанных осадков за 12 часов или более короткий период (рис. 5.1).

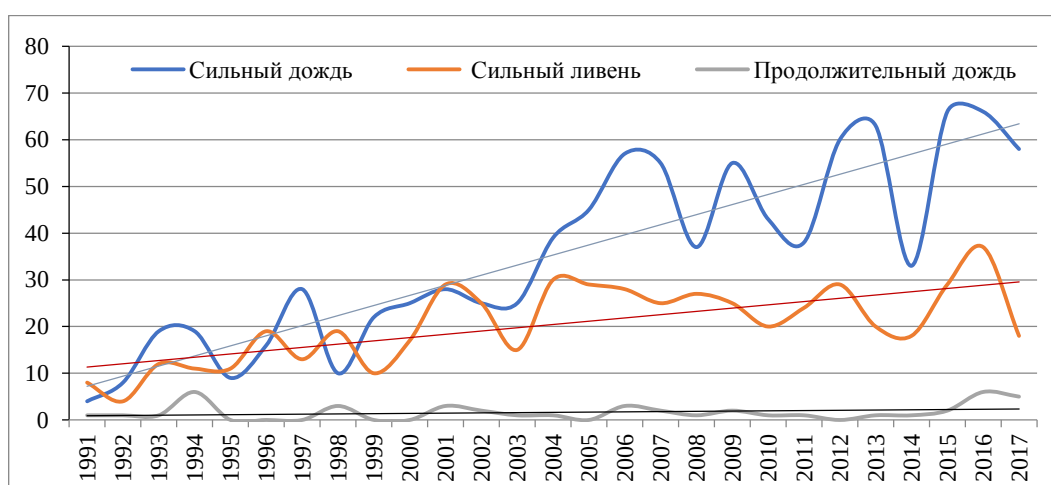


Рис. 5.1. Число опасных явлений (сильных осадков), нанесших значительный ущерб экономике и населению России.

⁵⁷ Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П., 2015: Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Издательство Кириллица», 256 с.

⁵⁸ Поэтому нельзя согласиться с выводами работы Коршунова А. А. и др. (Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие экономики России для обслуживания потребителей: результаты статистического анализа опасных условий погоды, 2010 // Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 174), что в период с 1991 по 2008 гг. из секторов экономики наиболее чувствительны к различным гидрометеорологическим опасным метеорологическим явлениям и неблагоприятным условиям погоды стали жилищно-коммунальное хозяйство, топливно-энергетический комплекс, наземный транспорт и сельское хозяйство, а «остальные отрасли и **население**», пострадали от них значительно меньше. Сравнивать ущерб для отраслей экономики отдельно от ущерба для населения представляется некорректным, так как любое проявление негативных последствий ОЯ сказывается на физическом или психическом здоровье человека, а в случае глобальных катастроф, таких как: крупные наводнения, лесные природные пожары — влечет за собой и значительные затраты финансовых и материально-технических ресурсов.

⁵⁹ Порфирьев Б. Н., 2013: Экономическая оценка людских потерь при чрезвычайных ситуациях // Вопросы экономики, № 11, с. 46—68.

В период с 1991 по 2018 г. доля экстремальных осадков превысила 25 % от общего количества основных типов экстремальных погодных явлений. Например, из 580 погодных катаклизмов 2015 года 200 были связаны с сильными осадками: на них приходится более 55 % экономических потерь от всех ОЯ.⁶⁰ За последние 25 лет количество ОЯ, связанных с осадками, значительно изменилось в летний период: количество сильных ливней возросло на 40 %.

Наибольшее количество случаев сильных осадков наблюдается на территории Дальневосточного и Северокавказского ФО. Это связано с климатическими особенностями указанных регионов: муссонным режимом Дальнего Востока и влиянием орографического рельефа на осадки Северокавказского региона. Повторяемость экстремальных суточных сумм осадков с 2000 г. особенно возросла на территориях Сибирского (более чем в 4 раза) и Центрального ФО. Заметно выражена тенденция увеличения числа дней с аномально большими осадками в западных районах Ямало-Ненецкого АО и центральных районах Республики Саха-Якутия в осенний период. На остальной территории России увеличение числа опасных осадков не превышает 35 %.

Зимой количество случаев сильных осадков увеличивается на большей части территории России, причем максимум роста наблюдается в северных районах ЕЧР и Сибири, в Прибайкалье и на Сахалине. При этом зимой на большей части страны увеличивается число дней без осадков. Большое количество осадков зимой и весной обуславливает высокий уровень весеннего половодья; летом сильные ливни часто становятся причиной катастрофических наводнений. Наиболее уязвимыми к сильным осадкам являются такие сектора экономики, как транспорт, энергетика. ЖКХ.⁶¹

На большей части территории России во все сезоны происходит увеличение числа дней с аномально высокими температурами воздуха; наиболее значительный рост наблюдается летом, особенно на АЧР. Температурный режим летнего сезона характеризуется повышением повторяемости волн тепла и увеличением их продолжительности и повторяемости.

Особый случай представляет собой тепловая волна на ЕЧР летом 2010 г. В частности, в Москве продолжительность периода со среднесуточной температурой выше средней многолетней составила 53 дня, а выше 25 °С — 32 дня. Число температурных рекордов (дней с максимальной за весь период регулярных метеорологических наблюдений температурой) составило в июле 10, а в августе 9 дней.⁶²

На здоровье человека периодически повторяющиеся волны тепла оказывают выраженный негативный эффект. По оценке UNISDR (Бюро ООН по снижению риска стихийных бедствий), волна тепла 2010 года в России вошла в первую десятку самых смертоносных бедствий на Земле за последние 20 лет (седьмое место в рейтинге

⁶⁰ Пустырский В. Е., Кукушкина А. В. Динамика количественных характеристик экстремальных атмосферных осадков на территории Российской Федерации // *Природообустройство*, (3), с. 115—120. doi: 10.34677/1997-6011/2019-3-115-120; Коршунова Н. Н., Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Давлетшин С. Г., 2018: Оценки экстремальности температурного режима и режима осадков для территории Российской Федерации и ее регионов // *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 183, с. 20—30; Шабанов П. А., Матвеева Т. А., Маркина М. Ю., 2017: Межгодовые изменения событий очень сильных осадков на Европейской части территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 4, с. 106—124.

⁶¹ Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П., 2015: Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Издательство Кириллица», 256 с.

⁶² Виноградова В. В., 2017: Волны тепла на территории России как фактор дискомфорта природной среды // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, вып. 4, с. 68—77.

бедствий). По данным центра EM-Dat от волны тепла 2010 г. в нашей стране погибли 55736 человек.⁶³

Помимо негативного воздействия на здоровье человека, аномально высокие температуры оказывают существенное влияние на различные сектора экономики:

- **Транспорт:** Размягчение дорожного покрытия, значительный перегрев рельсов и последующая деформация железнодорожных путей, приводящая к уменьшению скорости передвижения и увеличивающая риск схода с рельсов.
- **Энергетика:** Снижение эффективности теплового преобразования, что приводит к сокращению производства энергии на электростанциях; негативное влияние на процесс передачи электроэнергии (уменьшение исходной передаваемой мощности) при превышении уровня температуры +35 °С; возможно возникновение критических ситуаций (полное прекращение подачи электроэнергии из-за перегрева линий электропередач), возникновение занормативных состояний систем охлаждения агрегатов электростанций.
- **Жилищно-коммунальное хозяйство:** Увеличение затрат на кондиционирование зданий.
- **Сельское хозяйство:** Снижение урожайности из-за засух, негативное влияние на молочную продуктивность скота.

⁶³ Poverty & Death, 2016: Disaster Mortality 1996—2015, The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 22 p., http://www.unisdr.org/files/50589_creddisastermortalityallfinalpdf.pdf.

6. СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ⁶⁴

Прогнозирование климата, включая последствия его изменений, — центральная задача науки о климате. Этой задаче подчинены все направления фундаментальной науки о климате — от анализа и интерпретации данных наблюдений за климатической системой до исследований ее чувствительности к внешним воздействиям и предсказуемости.

Поведение климатической системы определяется взаимодействием пяти ее компонентов — атмосферы, океана, криосферы, биосферы и деятельного слоя суши. Характерные времена релаксации этих компонентов к внешним воздействиям различаются на несколько порядков. Благодаря нелинейности процессов, присущих указанным средам, и многообразию возникающих обратных связей, в климатической системе возникают собственные колебания различных временных масштабов. Климатическая система эволюционирует во времени под влиянием этой собственной (внутренней) динамики, а также внешних воздействий: естественных (извержения вулканов, колебания солнечной радиации) и антропогенных (изменения состава атмосферы, изменения в землепользовании).

Чтобы понять и предсказать поведение столь сложной системы под влиянием внешних воздействий (как антропогенных, так и естественных), необходимо использовать весьма ресурсоемкие физико-математические модели климатической системы⁶⁵, описывающие процессы в указанных средах с приемлемой степенью достоверности и детализации.

Поскольку часть неопределенности будущих изменений климатической системы обусловлена ее собственной изменчивостью и не может быть устранена усовершенствованием моделей, необходимо исследовать эту неизбежную неопределенность в вероятностном пространстве. С этой целью необходимо проводить ансамблевые расчеты с варьированием как начальных состояний, так и модельных параметров. Воспроизведение экстремальных и редких явлений также требует массовых ансамблевых расчетов. Наконец, оценки будущих изменений некоторых «медленных» компонентов климатической системы, таких как ледниковые щиты, или климатических характеристик, таких как уровень океана, требуют проведения длительных численных экспериментов. Поэтому не вызывает сомнений, что в обозримом будущем развитие высоких технологий и, прежде всего, компьютерной техники будет играть решающую роль в совершенствовании прогнозирования климата.

Сегодня во всем мире количество известных глобальных моделей исчисляется десятками. И среди них нет модели, лучше прочих описывающей, например, современный климат. Обычно каждая модель хорошо воспроизводит лишь часть интересующих климатических характеристик, в то время как остальная часть воспроизводится хуже. Наиболее высокую успешность, как правило, показывает «средняя» (по ансамблю) модель. Это связано с тем, что систематические ошибки

⁶⁴ Этот раздел основан на докладах Росгидромет (2008), Росгидромет (2014) и Росгидромет (2017).

⁶⁵ Развитие отдельных компонентов климатических моделей путем включения в них все более сложных описаний химических, биологических, биогеохимических процессов превратило эти модели, как сегодня принято говорить, в модели Земной системы.

отдельно взятых моделей не зависят друг от друга и при осреднении по ансамблю компенсируются.

На основе сценариев будущих эмиссий парниковых газов и аэрозолей с помощью современных моделей климата получены климатические сценарии⁶⁶. Следует принимать во внимание, что основным источником неопределенности сценарных прогнозов изменения климата на ближайшие десятилетия является собственная климатическая изменчивость, по сравнению с которой антропогенный сигнал еще невелик.

Основанные на расчетах с глобальными климатическими моделями сценарные прогнозы изменений глобального климата качественно согласуются для разных временных горизонтов XXI в., но количественно различаются, в зависимости от выбранного сценария и периода прогноза. Средняя глобальная температура будет возрастать при всех сценариях радиационного воздействия семейства RCP⁶⁷, по которым проводились расчеты будущих изменений климата в рамках CMIP5⁶⁸ — базового проекта МГЭИК⁶⁹. Наиболее вероятные оценки роста глобальной температуры в 2085—2100 гг. по отношению к 1986—2005 гг. в диапазоне 5—95 %

⁶⁶ Под климатическим сценарием понимают правдоподобную (или вероятную) эволюцию климатической системы в будущем, которая согласуется с предположениями о будущих эмиссиях (со сценариями эмиссий) парниковых газов и других атмосферных примесей, например, сульфатного аэрозоля, и с существующими представлениями о воздействии изменений концентрации этих примесей на климат. Соответственно, под сценарием изменения климата подразумевается разность между климатическим сценарием и современным состоянием климата. Поскольку сценарии эмиссий основываются на тех или иных предположениях о будущем экономическом, технологическом, демографическом и т. п. развитии человечества, климатические сценарии, равно как и сценарии изменения климата, следует рассматривать не как прогноз, но лишь как «сценарные прогнозы» — внутренне непротиворечивые картины возможных в будущем состояний климатической системы.

⁶⁷ В системе сценариев, широко используемой мировым научным сообществом в последние годы, основной исходной характеристикой является эволюция атмосферных концентраций радиационно активных примесей в будущем (т. н. «Representative concentration pathways» — RCP) и их радиационное воздействие к концу XXI века. Индекс сценария соответствует величине глобального антропогенного радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно: 2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м² — RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно. Эти сценарии сфокусированы на антропогенных выбросах и не включают изменения природных факторов, таких как солнечное или вулканическое воздействие или естественные выбросы парниковых газов. Сценарии RCP, таким образом, включают один сценарий сокращения выбросов, который предполагает весьма низкий уровень воздействия (RCP2.6); два сценария стабилизации (RCP4.5 и RCP6.0) и самый «агрессивный» сценарий с высокими уровнями выбросов парниковых газов (RCP8.5). RCP отражают результаты ряда направлений политических мер в области климата в XXI веке. В результате модельных расчетов по сценариям RCP6.0 и RCP8.5 радиационное воздействие не достигает максимального значения к 2100 г.; в то время как для сценария RCP2.6 оно достигает максимума и затем снижается, а для сценария RCP4.5 стабилизируется к 2100 г. См. Van Vuuren D., 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, p. 5—31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

⁶⁸ Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Am. Meteor. Soc.*, v.93, p. 485—498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

⁶⁹ В настоящее время МГЭИК рассматривает новое семейство сценариев внешнего воздействия на климат, известное как «Общие социально-экономические пути» (SSP). В рамках очередной фазы проекта CMIP — CMIP6 продолжаются расчеты с новыми климатическими моделями (моделями земной системы), которые займут центральное место в очередном (6-м) Оценочном докладе МГЭИК (в 2022 г.). (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., and Sanderson B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461—3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.)

моделей CMIP5 для различных сценариев антропогенного воздействия на климат составляют: ,2—1,8 °C (RCP2.6), 1,0—2,6 °C (RCP4.5), 1,3—3,2 °C (RCP6.0), 2,6—4,8 °C (RCP8.5). Для сценариев RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 глобальный рост температуры к 2100 г., вероятно, превысит 2 °C, по отношению к доиндустриальному периоду, и не превысит этот рубеж для сценария RCP2.6. Что касается глобальных осадков, то они с высокой вероятностью в текущем столетии вырастут. Скорость их роста по отношению к росту температуры вероятно составит 1—3 % на 1 °C для всех сценариев, кроме RCP2.6. Для последнего сценария диапазон чувствительности составит 0,5—4 % на 1 °C к концу XXI века.

Ниже приводятся сценарные прогнозы для территории России с использованием как непосредственно результатов расчетов с глобальными климатическими моделями⁷⁰, так и результатов детализации таких расчетов в физическом и вероятностном пространстве с помощью региональной климатической модели. Последние были положены в основу сценарных оценок изменений климатических воздействий, описанных в разделе 7 «Ожидаемые изменения климатических воздействий на экономику и население».

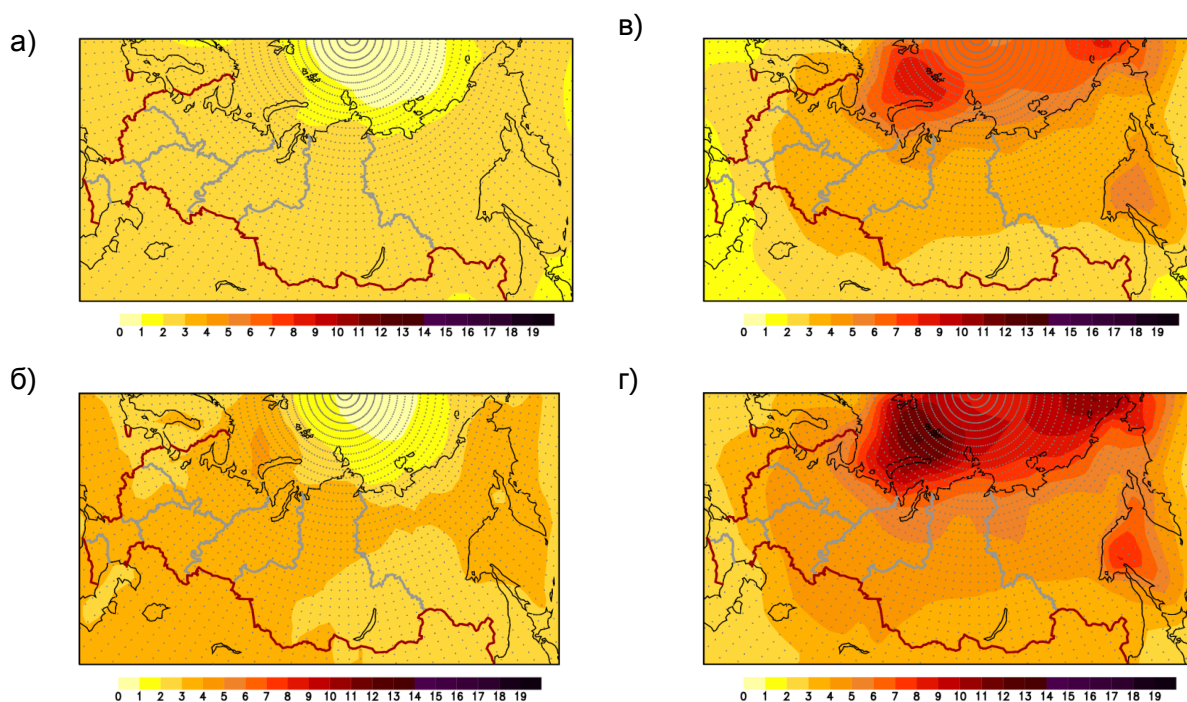


Рис. 6.1. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха (°C) в периоды 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к концу XX в. летом (а, б) и зимой (в, г) по оценкам ансамбля, состоящего из 31 модели CMIP5, для сценария воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышают 1.⁷¹

⁷⁰ Росгидромет, 2014.

⁷¹ Росгидромет, 2014.

По оценкам, полученным на основе расчетов с ансамблем глобальных моделей, на территории России (рис. 6.1), согласно «умеренному» сценарию RCP4.5, наиболее заметные изменения средней летней температуры ожидаются в Северо-Западном и Уральском округах. В середине века на арктическом побережье потепление достигнет 3 °С, а в конце XXI века — 3,5—4,5 °С. Зимой в ближайшей перспективе следует ожидать максимального потепления в тех же регионах, что и летом, но зимнее потепление окажется большим. При более «агрессивном» сценарии RCP8.5 качественные (а в краткосрочной перспективе и количественные) изменения термического режима будут близкими к сценарию RCP4.5. Однако начиная с середины XXI века, скорость изменений температуры по сценарию RCP8.5 как зимой, так и летом, оказывается в 1,2—1,4 раза большей по сравнению с RCP4.5. В целом необходимо отметить высокую степень согласованности рассчитанных по моделям изменений средней сезонной температуры в течение всего XXI века, как для зимнего, так и для летнего сезонов. При этом отношение сигнала к шуму (отношение среднего по ансамблю изменения температуры к стандартному отклонению изменений в ансамбле) оказывается большим единицы в течение всего XXI века на всей территории России (рис. 6.1).

Картина изменения средних сезонных осадков (рис. 6.2) свидетельствует об устойчивой тенденции их роста на всей территории России зимой при потеплении для всех сценариев и временных рамок прогноза.

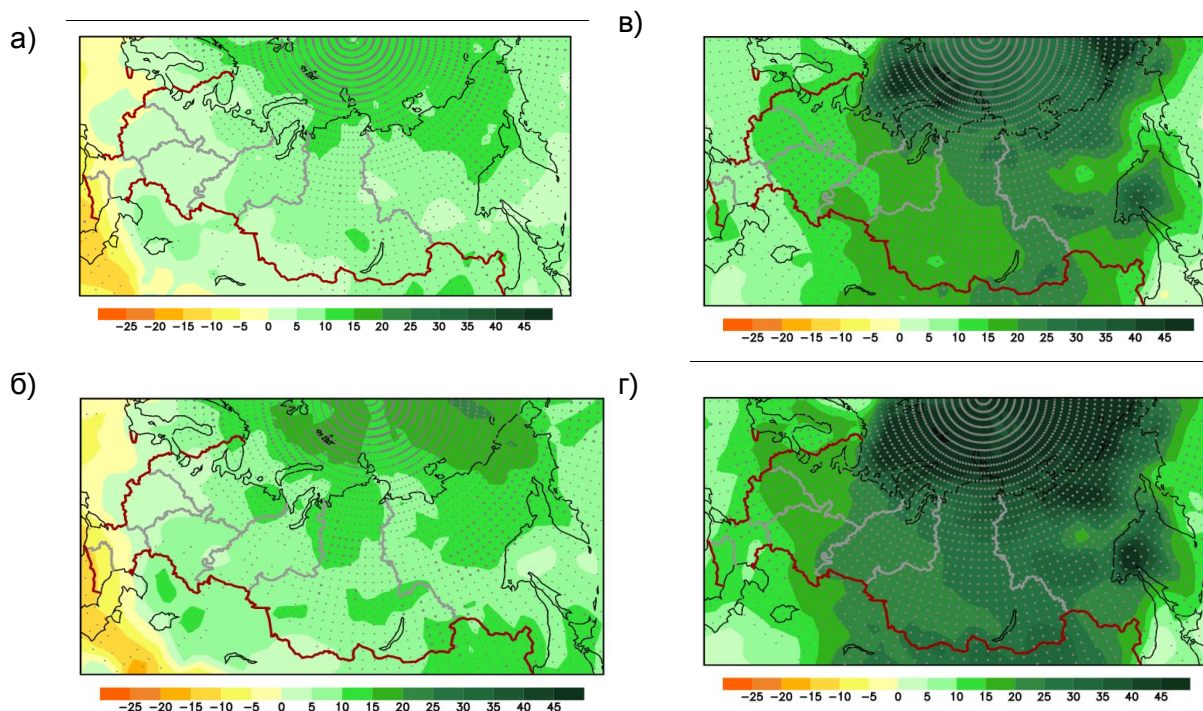


Рис. 6.2. Изменения средних сезонных осадков в периоды 2041—2060 и 2080—2099 гг. по отношению к концу XX в. летом (а, б) и зимой (в, г) по оценкам ансамбля, состоящего из 31 модели CMIP5, и сценарию воздействия парниковых газов и аэрозолей RCP4.5.

Мелкими точками показаны регионы, где более 66 % моделей дают одинаковый знак изменений, крупными — районы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90 % моделей.⁷²

⁷² Росгидромет, 2014.

Анализ модельных расчетов показал, что, согласно сценарию RCP8.5, в Сибири возможен полуторакратный рост осадков относительно базового периода. В летний сезон рост средних осадков ожидается на большей части территории России, за исключением южных регионов, где по сценарию RCP8.5 возможно уменьшение осадков до 25 % к концу XXI века относительно базового периода.

Для моделирования ряда климатически значимых процессов, а также для получения перспективных оценок климатических изменений с необходимой в некоторых исследованиях климатических воздействий детализацией важно такое сочетание разрешения в физическом и вероятностном пространствах, которое в обозримом будущем вряд ли будет обеспечено глобальными климатическими моделями. Эта ситуация сохраняет перспективы для региональных климатических моделей (РКМ). Атмосферные компоненты большинства современных глобальных климатических моделей имеют горизонтальное разрешение 100—300 км, а РКМ к настоящему времени в ряде случаев уже перешагнули рубеж 10 км. Наиболее распространенное на сегодняшний день разрешение РКМ — 20—30 км. Такое разрешение позволяет учитывать влияние на эволюцию климата мезомасштабных факторов — более реалистичной топографии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности и свойств подстилающей поверхности, детального описания прибрежных зон и т. п.

На протяжении последних лет Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета (ГГО) активно развивает и применяет в исследованиях *Многофункциональную высокоразрешающую модульную систему вероятностного прогнозирования региональных изменений климата, связанных с внешними воздействиями*⁷³. Эта система, центральным компонентом которой является разработанная в ГГО РКМ⁷⁴, предназначена для детализации оценок климатических воздействий в физическом и вероятностном пространствах. Иными словами, речь идет об относительно высоком пространственном разрешении и об относительно больших ансамблях расчетов ожидаемых изменений климата для представляющих интерес территорий. И то и другое обуславливает потребность в значительных вычислительных ресурсах, с чем и связана «модульность» системы, которая, в зависимости от наличия ресурсов, может состояться из разных компонентов; в том числе, с использованием граничных условий, полученных в расчетах с глобальными моделями, например, участвующими в международных проектах сравнения, таких как CMIP. В исследованиях разнообразных климатических

⁷³ 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 1: Постановка задачи и численные эксперименты // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, 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 2: Оценки климатических воздействий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 593, с. 6—52.

⁷⁴ Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015: Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, 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.

воздействий в качестве модулей системы могут использоваться менее сложные модели многолетней мерзлоты, пограничного слоя атмосферы, русловых потоков и др., придающие системе гибкость и позволяющие ориентировать ее на конкретные задачи, например, в интересах тех или иных отраслей экономики.

Использование большого ансамбля расчетов с моделью высокого разрешения (рис. 6.3)⁷⁵ позволяет рассматривать изменения климата для сравнительно небольших по площади территорий, например, субъектов Российской Федерации, в виде вероятностных функций распределения тех или иных климатических характеристик (рис. 6.4). Полученные распределения для таких территорий позволяют оценить особенности ожидаемых изменений климатических характеристик — не только средних по ансамблю, но и экстремальных значений.

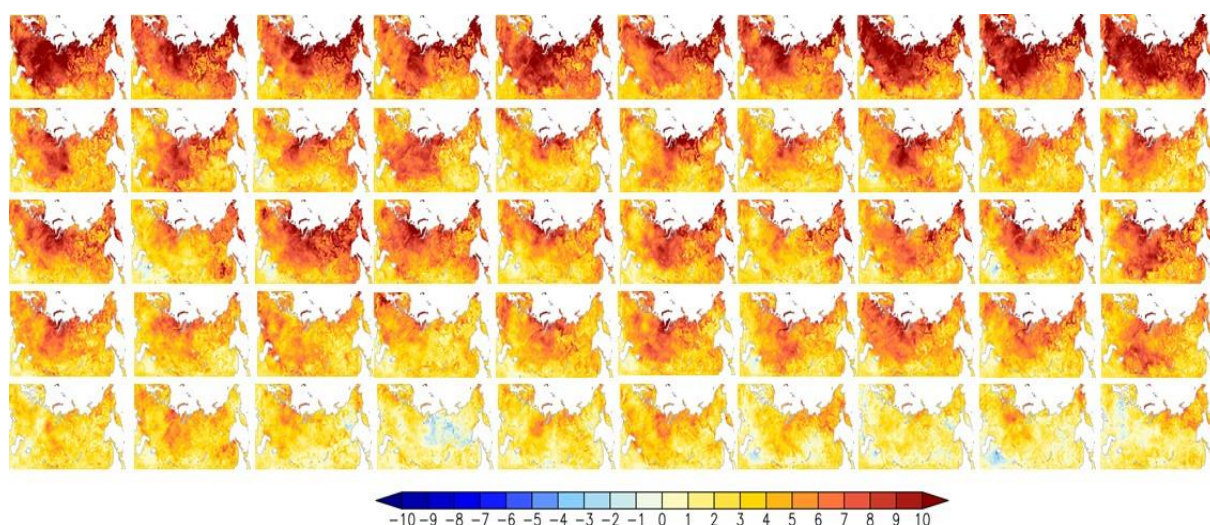


Рис. 6.3. Изменение годового минимума температуры приземного воздуха (°C) в 2050—2059 гг. по отношению к базовому периоду (1990—1999 гг.) по оценке индивидуальных расчетов РКМ, составляющих ансамбль из 50 членов.

Сценарий МГЭИК RCP8.5.⁷⁶

Результаты расчетов с РКМ при заданных (из расчетов с глобальными моделями) условиях на боковых границах могут быть использованы как в исследованиях локальных физических процессов, так и в оценках климатических воздействий. Качество расчетов с РКМ зависит от качества расчетов крупномасштабной циркуляции с помощью глобальных моделей, однако, РКМ способны «добавлять качество» по отношению к расчетам с глобальными моделями, в частности, приближая к реальности диапазон изменчивости регионального климата, занижаемой глобальными моделями из-за сравнительно грубого пространственного разрешения.⁷⁷

⁷⁵ 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.

⁷⁶ Shkolnik I., 2017: CORDEX projections and adaptation issues in the Arctic / WCRP-sponsored Arctic-CORDEX Workshop, Cambridge, United Kingdom.

⁷⁷ Kharin V., Zwiers F., Zhang X., Wehner M., 2013: Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble // Bulletin of the American Meteorological Society Climatic Change, vol. 119, pp. 345—357; Sillmann J., Kharin V., Zwiers F. et al., 2013: Climate extremes indices in the

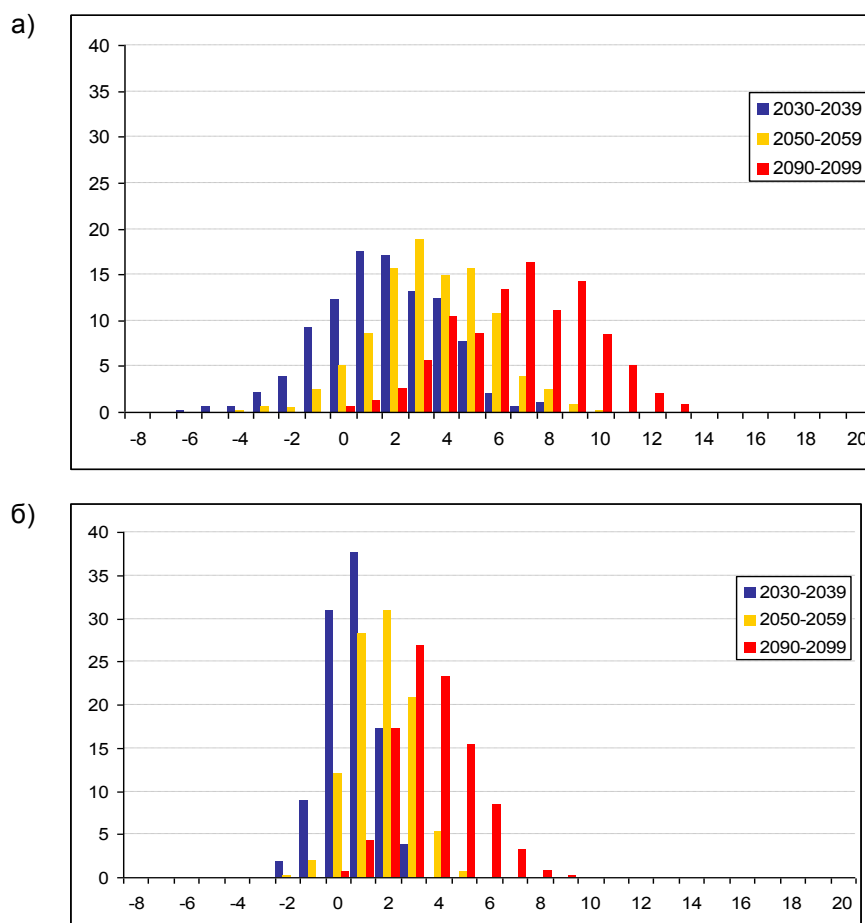


Рис. 6.4. Вероятностные функции распределения изменений средней за сезон температуры приземного воздуха в Санкт-Петербурге для зимы (а) и лета (б), построенные по ансамблю из 50 членов расчетов с помощью региональной климатической модели ГГО для первой трети, середины и конца XXI в. — по 500 годам для каждого временного периода (сценарий RCP8.5).

По оси абсцисс отложены градации изменения температуры ($^{\circ}\text{C}$), по оси ординат — количество «попаданий» средней по региону оценки изменения температуры в соответствующую градацию, %. Синим цветом показано распределение изменений температуры для первой трети XXI в. (2030—2039 гг.), желтым — для середины XXI в. (2050—2059 гг.), красным — для конца XXI в. (2090—2099 гг.) по отношению к базовому периоду (1990—1999 гг.).⁷⁸

Высокое разрешение делает РКМ особенно полезным инструментом исследования таких экстремальных явлений, которые сочетают сравнительно малый пространственный масштаб с большим потенциалом воздействия.⁷⁹ К числу таких явлений следует отнести, в первую очередь, гидрологические явления (рис. 6.5),

CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 118, pp. 2473—2493.

⁷⁸ Катцов В. М., Школьник И. М., Акентьева Е. М., Ефимов С. В., Мещерская А. В., Пикалева А. А., 2018: Изменения климата на территории Санкт-Петербурга в контексте глобального потепления / В кн.: Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2017 г. (под ред. И. А. Григорьева, И. А. Серебрицкого) — СПб: ООО «Сезам-принт», 450 с.

⁷⁹ Rummukainen M., Rockel B., Bärring L. et al., 2015: Twenty-First-Century Challenges in Regional Climate Modeling // Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 96, № 8, pp. ES135—ES138.

имеющие высокую локализацию и приводящие к большому ущербу в социальной сфере и в энергетическом секторе экономики.

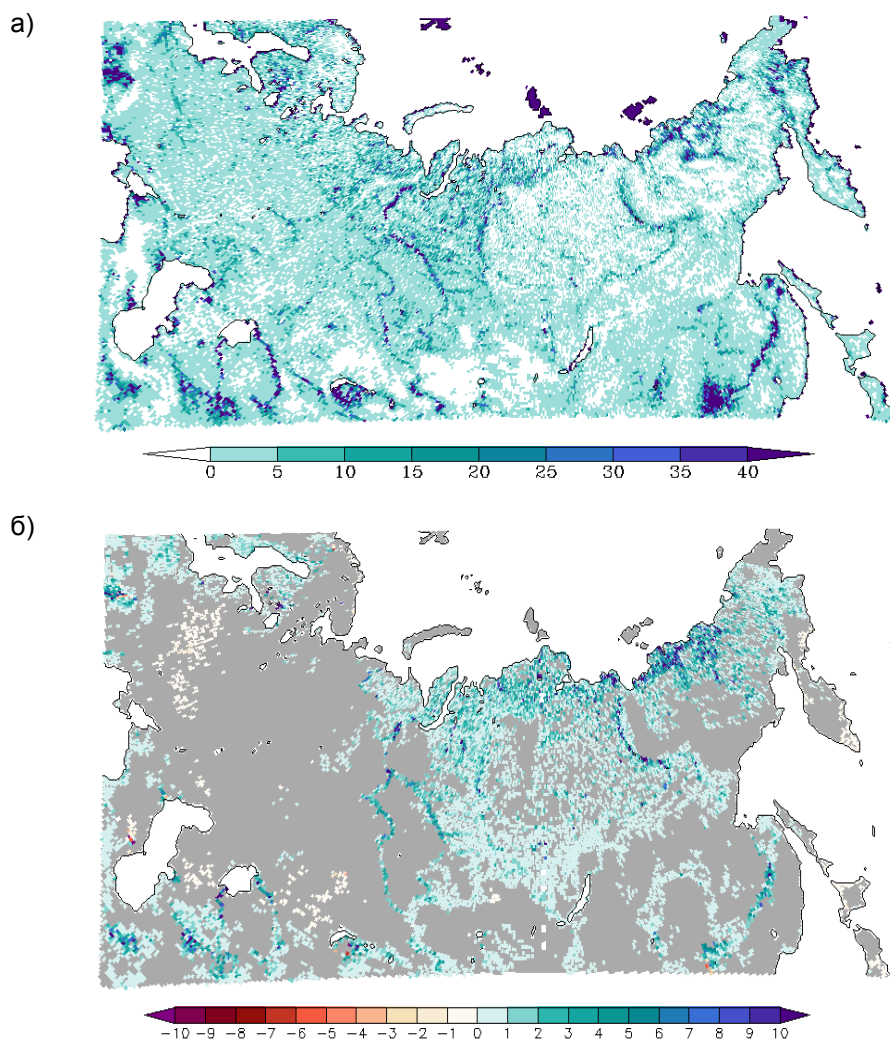


Рис. 6.5. Доли ячеек сетки (%) 25×25 км, (а) подверженные затоплению в период максимальных в году наводнений в базовом климате (1990—1999 гг.) и (б) возможные изменения таких площадей к 2050—2059 гг. при реализации сценария радиационного воздействия МГЭИК RCP8.5.

Оценки получены по ансамблю (30 членов) расчетов изменений климата с помощью системы моделей РКМ и гидрологической модели трансформации русловых потоков CaMa-Flood. Серым цветом на нижнем рисунке показаны регионы, где отношение «сигнал-шум» для изменений площадей не достигает 1, либо наводнения не возникают.⁸⁰

Так, большое значение с практической точки зрения имеет оценка изменений повторяемости экстремальных расходов воды на тех створах рек, где расположены крупные объекты энергетической инфраструктуры. Если изменения средних годовых расходов воды определяют, в первую очередь, изменения гидроэнергетического потенциала рек, то повышение частоты или повторяемости экстремальных колебаний

⁸⁰ Shkolnik I., T. Pavlova, S. Efimov, S. Zhuravlev, 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*, 50:215–230 DOI 10.1007/s00382-017-3600-6.

стока может нарушать нормальное функционирование таких объектов и, в конечном счете, способствовать снижению энергобезопасности регионов. Некоторые из объектов расположены на одном и том же водосборе (например, на водосборе р. Волга) и подвержены взаимному влиянию из-за локального регулирования интенсивности водотока, вследствие чего влияние экстремальных расходов воды на каждый объект в отдельности может ослабляться. Тем не менее, крупномасштабные изменения экстремальных объемов воды могут угрожать функционированию одновременно нескольких таких объектов и снижать положительный эффект локального регулирования водотока. Ансамблевые расчеты, основанные на использовании РКМ и моделей речного стока,⁸¹ показывают, что летом на волжском водосборе в будущем возможен рост расходов воды редкой повторяемости на четырех из девяти ГЭС (рис. 6.6).

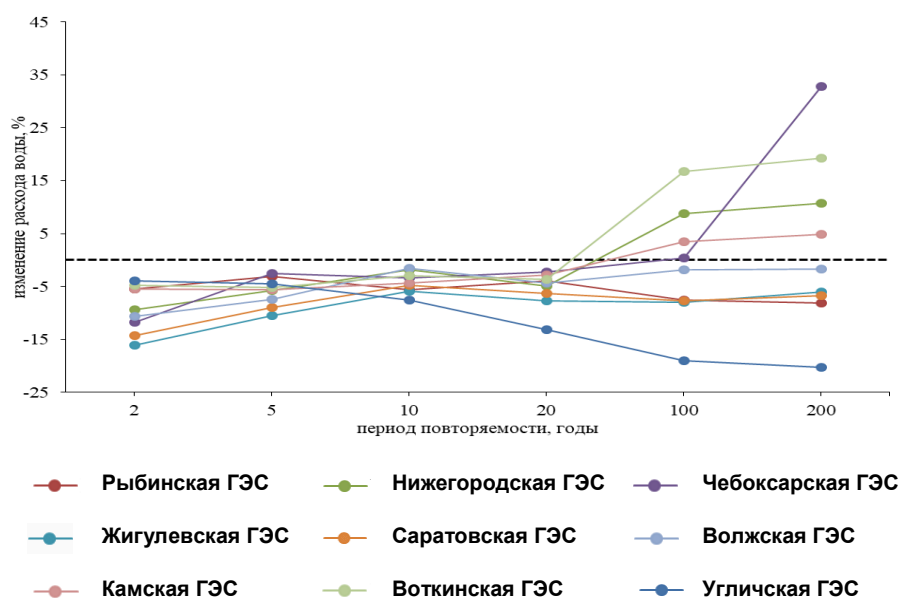


Рис. 6.6. Изменение расхода воды (%) к 2050—2059 гг. относительно периода 1990—1999 гг. летом на створах рек, где расположены ключевые ГЭС Волжского каскада.

Результаты расчета по РКМ и модели трансформации русловых потоков CaMaFlood к 2050—2059 гг. Сценарий RCP8.5 МГЭИК.⁸²

Значительный интерес представляют возможные изменения в пространственной структуре многолетнемерзлых грунтов, имеющих крайне нерегулярное распределение с большим числом локальных особенностей и требующих для своего описания использования высокоразрешающих моделей климата. Совместное использование региональных моделей и модели теплопереноса в грунтах позволяет провести анализ особенностей динамики термического состояния многолетнемерзлых грунтов в разных регионах (в частности, в арктических регионах России) с учетом локальных характеристик рельефа и подстилающей поверхности.⁸³

⁸¹ Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2015: 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* 50:215–230 DOI 10.1007/s00382-017-3600-6.

⁸² Shkolnik I., T. Pavlova, S. Efimov, S. Zhuravlev, 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*, 50:215–230 DOI 10.1007/s00382-017-3600-6.

⁸³ <http://www.climate-cryosphere.org/activities/targeted/polar-cordex/arctic>

7. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭКОНОМИКУ И НАСЕЛЕНИЕ

Повышение качества прогнозирования экстремальных явлений, приводящих к большим ущербам, и создание эффективных систем раннего предупреждения является одним из направлений превентивной адаптации к климатическим воздействиям.⁸⁴ В современных условиях критически важным становится также принятие мер, направленных на снижение уязвимости населения, объектов инфраструктуры и экономики в целом к будущим изменениям климата.⁸⁵ Для разработки и климатологического обоснования стратегий адаптации к ожидаемым изменениям климата в РФ необходимо опираться на количественные оценки изменения климатического воздействия на экономику и социальную сферу, полученные использованием современных возможностей физико-математического моделирования.

В конце XX — начале XXI вв. в качестве основного инструмента получения научно-обоснованной информации о будущем климате в тех или иных регионах рассматривались глобальные климатические модели. В рамках подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК⁸⁶ с помощью ансамбля моделей поколения CMIP5⁸⁷ были выполнены расчеты климата XXI века для различных сценариев антропогенных выбросов⁸⁸. Результаты этих расчетов явились основой многих исследований по оценке последствий изменений климата для территории России, которые нашли отражение во Втором оценочном докладе Росгидромета⁸⁹.

Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что использование глобальных моделей для прикладных исследований регионального климата имеет ряд существенных ограничений, связанных с недостаточным пространственным разрешением современных глобальных моделей. Полезным инструментом получения детализированной информации о региональном климате и его изменениях служат региональные климатические модели, основанные на общих с глобальными моделями принципах, но имеющие более высокое пространственное разрешение.⁹⁰ С целью скоординированной оценки будущих климатических изменений в различных регионах мира под эгидой Всемирной Программы Исследования Климата⁹¹ был организован

⁸⁴ Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, et al. eds.) — Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2010.

⁸⁵ Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., 2017: Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 586, с. 7—20.

⁸⁶ 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., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.)] — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

⁸⁷ Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012: An Overview of CMIP5 and the experiment design // Bull Am Meteor Soc 93: 485—498. doi10.1175/BAMS-D-11-00094.1

⁸⁸ Vuuren D. P. van, Edmonds J., Kainuma M., et al., 2011: The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change, vol. 109, pp. 5—31; doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

⁸⁹ Росгидромет, 2014.

⁹⁰ Rummukainen M., Rockel B., Bärring L., et al., 2015: Twenty-First-Century Challenges in Regional Climate Modeling // Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 96, №.8, pp. ES135—ES138

⁹¹ <https://www.wcrp-climate.org>

международный проект CORDEX⁹², к участию в котором были допущены региональные модели с разрешением не более 50 км. Такое разрешение позволяет учитывать влияние на атмосферу мезомасштабных факторов — реалистичной орографии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности и свойств подстилающей поверхности, а также сложных взаимодействий вблизи границы раздела сред «суша — вода». Учет этих особенностей существенно повышает информативность сценарных прогнозов и обуславливает широкое применение моделей этого класса в задачах оценки климатических воздействий на региональном уровне (см., например, Приложение 3⁹³).

Создание информационной основы управления климатическими рисками предполагает дальнейшее развитие методологии климатического прогнозирования с целью количественного описания неопределенностей оценок, связанных с влиянием собственной изменчивости климатической системы в мезомасштабном диапазоне. Результаты, 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 модель⁹⁴, имеющая горизонтальное разрешение 25 км. Описание данной технологии климатического прогнозирования и некоторые результаты ее применения нашли в ряде недавних работ⁹⁵.

⁹² <http://www.cordex.org>

⁹³ 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.

⁹⁴ Школьник И. М., Ефимов С. В., 2015: Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 576, с. 201—211.

⁹⁵ 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., Ефимов С. В. и др., 2016: Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 1: Постановка задачи и численные эксперименты // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 583, с. 7—29; Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н. и др., 2019: Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 593, с. 6—52; 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; Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: 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., 2019: Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология, № 7, с. 5—16; 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; 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 // Environ. Res. Lett., vol. 14. 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>; Шапошников Д. А., Ревич Б. А., Школьник И. М., 2019: Сценарные оценки потепления климата и

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ДАННЫЕ

В настоящее время при анализе изменения климатических воздействий на экономику используется, как правило, т. н. индикаторный подход⁹⁶, предполагающий привлечение специальных климатических индексов, изменение которых отражает то или иное влияние на рассматриваемые объекты. Для некоторых видов воздействий возможным является применение интегрированного подхода⁹⁷, в рамках которого модели воздействия (физические, экономические) непосредственно связываются с моделями эволюции климата. Однако такой подход обычно реализуется на основе упрощенных климатических моделей. Прямое использование выходной продукции сложных климатических моделей является довольно редким.⁹⁸ Даже при наличии развитых физических моделей отклика на климатические воздействия (таких как модель «климат–почва–урожай») их применению предшествует, как правило, оценка изменений специализированных климатических показателей (например, агроклиматических индексов, см. Приложение 2).

При получении перспективных оценок изменений климата, имеющих широкое применение в исследованиях климатических воздействий⁹⁹, первоочередное внимание уделяется оценкам индексов, рекомендованных экспертами ВМО¹⁰⁰ для анализа изменений климата и, в особенности, его экстремальности по данным о температуре воздуха и количестве осадков суточного разрешения. Наибольшее распространение имеет набор ключевых индексов, предложенных группой экспертов по обнаружению изменений климата и индексам (ETCCDI).

Со статистической точки зрения упомянутые индексы могут быть разделены на следующие группы: 1) средние и экстремальные месячные и годовые значения температуры воздуха и суммы осадков 2) число дней с выходом значений переменной

смертности населения Российских приарктических городов в XXI веке // Анализ риска здоровью. № 4, с. 37—49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.04

<https://journal.fcisk.ru/sites/journal.fcisk.ru/files/upload/article/405/health-risk-analysis-2019-4-4.pdf>; Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2020: Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике РФ // Метеорология и гидрология, № 5, с. 46—58.

⁹⁶ European Environmental Agency. Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. Joint European Environmental Agency (EEA)-Joint Research Council (JRC)-World Health Organization report. EEA Report No 4/2008; JRC Reference Report № JRC47756 (EEA, Copenhagen, Denmark); 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.

⁹⁷ Goodess C. M., Hanson C., Hulme M., Osborn N. J., 2003: Representing Climate and Extreme Weather Events in Integrated Assessment Models: A Review of Existing Methods and Options for Development. Integrated Assessment, vol.4. № 3, pp.145—171.

⁹⁸ 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.

⁹⁹ L G., Zhang X., Cannon A. J., Murdock T. Q., Sobie S., Zwiers F. W., Anderson K., Qian B., 2018: Indices of Canada's future climate for general and agricultural adaptation applications // Climatic Chang, 148 (1—2):249—263. doi:10.1007/s10584-018-2199-x; Schoof J. T., Robeson S. M., 2016: Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States // Weather and Climate Extremes, vol.11, pp. 28—40.

¹⁰⁰ Alexander L. V., 2016: Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond // Weather and Climate Extremes, vol.11, pp. doi: 4—16. 10.1016/j.wace.2015.10.007; Sillmann J., Kharin V. V., Zhang X., Zwiers F. W., Bronaugh D., 2013: Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections // J. Geophys. Res. Atmos., vol. 118, pp. 2473—2493, doi:10.1002/jgrd.50203.

за критический уровень, 3) продолжительность периодов с особыми условиями (например, с осадками ниже критического уровня), 4) суммы температур выше/ниже критического уровня. Для диагностических целей в качестве критических уровней привлекаются значения процентилей распределения температуры воздуха и осадков суточного разрешения. Для оценки изменений климатических воздействий на различные объекты и процессы представляет интерес рассмотрение конкретных значений пороговых уровней. Например, для сельского и лесного хозяйства на территории России важны характеристики продолжительности и сумм активных температур, связанных с переходом через такие уровни как +5 и +10 °C. Аналогичные климатические показатели используются при изучении ареалов распространения различных трансмиссивных заболеваний. В то же время для оценки изменения энергопотребления в летний сезон имеет значение анализ изменения дефицита холода, рассчитываемого как сумма температур выше +18 °C. С методической точки зрения различия между упомянутыми индикаторами не являются существенными.

Климатические индексы, рекомендованные ВМО, рассчитываются по унифицированным алгоритмам и обеспечивают возможность последующего анализа современных и будущих изменений рассматриваемых показателей в глобальном масштабе. Однако при разработке адаптационных программ на национальном уровне и выборе ключевых индексов необходимо дополнительно учитывать региональные климатические особенности, а также сложившуюся практику использования климатической информации для прикладных целей.

Далее для количественного описания будущих изменений термического режима привлекается ряд показателей, имеющих универсальное назначение, в частности, различные виды экстремумов температуры воздуха холодного и теплого периодов года, а также характеристики внутригодовых периодов с температурой воздуха выше/ниже пороговых значений. В качестве пороговых значений выбираются уровни, критически важные для обеспечения потребностей строительства, наземного транспорта, энергетики (0, +8, +18 °C). Кроме того, рассматриваются важные показатели режима атмосферных осадков, такие как длительность сухих/влажных периодов и связанные с ними экстремумы количества и суточной интенсивности осадков.

Анализ изменения выбранных климатических показателей в XXI в. основан на результатах численных экспериментов, которые проводились для базового десятилетнего периода конца XX в. (1990—1999 гг.), а также периодов 2050—2059 гг. и 2090—2099 гг. с применением сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5.¹⁰¹ Задание граничных условий на поверхности океана осуществлялось на основе расчетов температуры поверхности океана (ТПО) и сплоченности морского льда (МЛ) для рассматриваемых 10-летних интервалов по пяти глобальным моделям CMIP5.¹⁰² Для всех пяти вариантов эволюции ТПО и МЛ было проведено по 10 экспериментов от разных (случайных) начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши. Таким образом, для каждого из рассматриваемых десятилетних периодов были получены модельные данные за 500 лет.

¹⁰¹ Vuuren D. P. van, Edmonds J., Kainuma M., et al., 2011: The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*, vol. 109, pp. 5—31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.

¹⁰² Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н. и др., 2019: Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*, вып. 593. с. 6—52.

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИНДИКАТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ: МЕДИАННЫЕ АНСАМБЛЕВЫЕ ОЦЕНКИ

Рассчитанные на основе результатов моделирования годовые и сезонные индикаторы термического режима и режима увлажнения дают представление об изменении региональных условий воздействия климата на разные виды экономической деятельности, в особенности, на такие отрасли как энергетика, строительство, наземный транспорт.

Продолжительность периода с отрицательной температурой воздуха и соответствующее число градусо-дней (рис. 7.1а, б) являются важными характеристиками холодного климата, свидетельствующими о степени его суровости. Уменьшение периода с температурой воздуха менее 0 °С к середине XXI в. составит более 20 дней на большей части территории России и благотворно повлияет на добычу первичных энергоресурсов, функционирование наземного транспорта, а также проведение строительных работ.

Анализ будущих изменений пороговых характеристик суточных минимумов температуры воздуха выявил (рис. 7.1в) значительное сокращение числа дней с низкими температурами (ниже –30 °С) в азиатской части Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), которое уменьшит негативное температурное воздействие

на характеристики материалов различных конструкций. В то же время практически на всей территории ЕЧР возрастет число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (т. е. дней с разными знаками суточного минимума и суточного максимума температуры) в период с ноября по март, который рассматривается в строительной климатологии как холодный сезон (рис. 7.1г). Наибольшее увеличение — в южных районах ЕЧР и Средней Сибири, Прибайкалья и Забайкалья, на прибрежных территориях Дальнего Востока — к середине XXI в. превысит 10 случаев за сезон. Изменение этого климатического показателя будет способствовать усилению температурно-влажностных деформаций, оказывающих разрушающее воздействие на здания и сооружения, включая автомобильные дороги.

Сокращение продолжительности отопительного периода (рис. 7.1д), а также связанное с этим уменьшение градусо-суток отопительного периода (рис. 7.1е), является одним из позитивных проявлений изменения климата на территории России. Наибольшее сокращение продолжительности отопительного периода ожидается на северо-востоке ЕЧР, а также на Чукотке и Камчатке (примерно на 50 дней к середине XXI в.). Потенциально это может способствовать уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года. Однако для извлечения реальной выгоды необходимо внедрение современных технологий производства энергии и теплоснабжения.¹⁰³

¹⁰³ 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; Приоритеты устойчивого развития Москвы: энергоэффективность, снижение уязвимости, климатическая адаптация, 2017: В кн. Материалы научно-практической конференции «Экология Московского региона —2017». — Москва, 56 с.

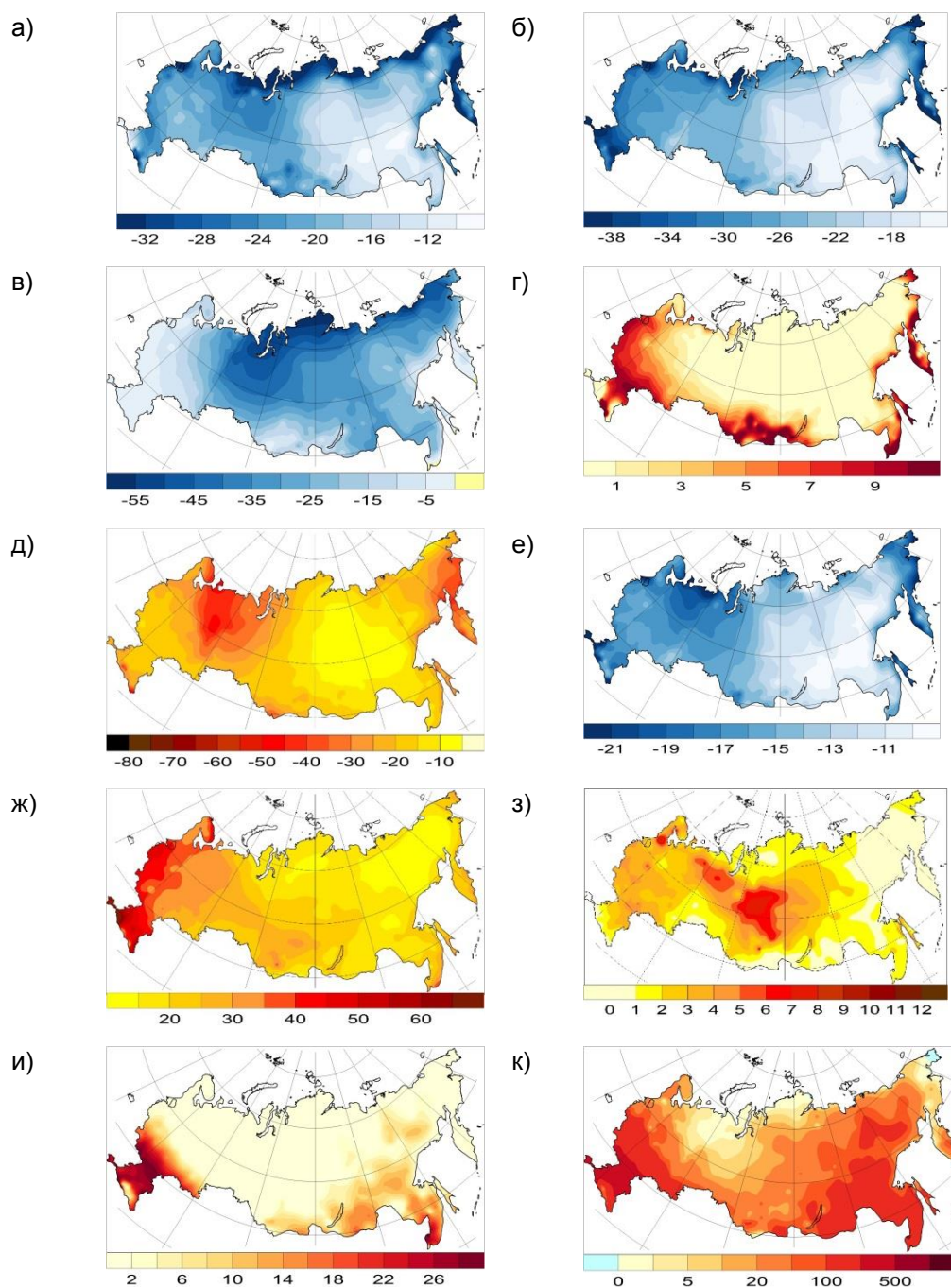


Рис. 7.1. Изменение показателей термического режима в 2050—2059 гг. по отношению к 1990—1999 гг.: а — продолжительность (дни) периода с отрицательной температурой воздуха, б — градусо-сутки периода с отрицательной температурой (%), в — число дней с суточной минимальной температурой $< -30^{\circ}\text{C}$, г — число дней с переходом температуры через 0°C , д — продолжительность (дни) отопительного периода, е — градусо-сутки отопительного периода (%), ж — доля (%) числа дней с избыточным теплоснабжением от общей продолжительности отопительного периода, з — мультипликатор частоты редких значений числа дней с избыточным теплоснабжением, соответствующих базовой частоте 1 раз в 20 лет, и — число дней с суточной максимальной температурой $> +30^{\circ}\text{C}$, к — индекс потребления энергии в летний период ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{сутки}$).

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.¹⁰⁴ При сохранении действующих технологий централизованного теплоснабжения к середине XXI века доля среднего числа дней с избыточным потреблением тепла на ЕЧР может превысить 30—40 % от общей продолжительности отопительного периода (рис. 7.1ж). При этом в 5—7 раз увеличится частота зим с большой долей числа дней с «перетопом» (рис. 7.1з), вероятность которых в конце XX в. составляла лишь 5 %. Одновременно вырастет и число дней с «недотопом».

Будущие изменения климата существенно повлияют на эффективность, надежность и безопасность объектов энергетической инфраструктуры, с одной стороны, и на комфортность зданий, с другой стороны. Так, увеличение числа дней с высокими значениями температуры воздуха в летнее время (рис. 7.1и) уменьшит эффективность процессов генерации и передачи электроэнергии; в то же время рост такого показателя, как дефицит холода (рис. 7.1к), отражает ожидаемое увеличение спроса на кондиционирование воздуха в рабочих и жилых помещениях на большей части территории России.

Интересные особенности обнаруживаются в изменении суточной амплитуды температуры воздуха, которая используется в строительной климатологии при определении нормативных параметров температурных воздействий, являющихся одним из видов атмосферных нагрузок.¹⁰⁵ Средние значения этой величины для теплого сезона уменьшаются на большей части территории России. Однако на юго-востоке ЕЧР и прилегающих районах Западной Сибири, в Забайкалье и южных районах Дальнего Востока, на Чукотке и Камчатке к середине XXI в. выявляется тенденция увеличения суточной амплитуды. Эта тенденция, усиливающаяся к концу века, хорошо проявляется в областях роста максимальной непрерывной продолжительности сухих периодов, отмечаемого как по модельным данным, так и по данным наблюдений,¹⁰⁶ и может быть связана с влиянием климатических изменений влажности почвы.

Существенные изменения, сопряженные с высокими рисками, ожидаются в режиме атмосферных осадков на территории России. Согласно модельным оценкам, к середине XXI в. в теплый сезон максимальная продолжительность влажного периода увеличится на территории Красноярского края, Якутии и в прилегающих районах. В среднем многолетнем выражении это увеличение составит 1—2 дня за 60 лет (рис. 7.2а). На остальной территории возможно незначительное уменьшение (0—1 дня).

¹⁰⁴ Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н. и др., 2019: Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 593. с. 6—52.

¹⁰⁵ Свод правил СП20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. — М.: Минрегион России, 96 с.

¹⁰⁶ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М., 2019: Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология, № 7, с. 5—16.

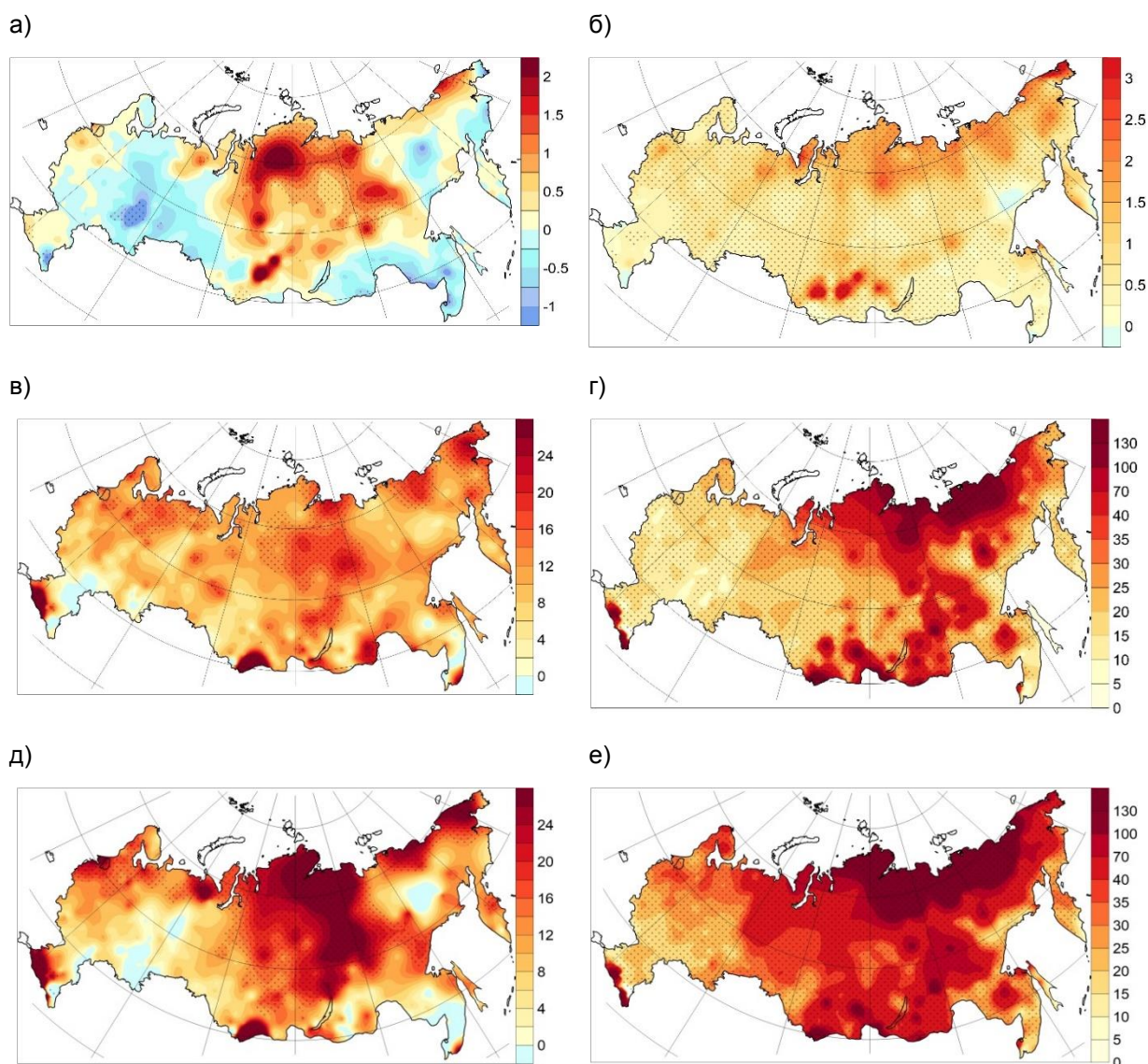


Рис. 7.2. Изменение характеристик влажных периодов теплого (слева) и холодного (справа) сезонов в 2050—59 гг. по отношению к 1990—99 гг.:

**а, б — максимальная за сезон непрерывная продолжительность влажного периода (дни),
в, г — максимальная за сезон средняя суточная интенсивность осадков влажного периода (в процентах от базовых значений),
д, е — максимальная за сезон сумма осадков влажного периода (в процентах от базовых значений).**

Практически на всей территории России в той или иной степени увеличится максимум суточной интенсивности осадков (рис. 7.2в), определяемый для каждого сезона из совокупности значений средней интенсивности для отдельных влажных периодов. Небольшое уменьшение возможно на прикаспийских территориях и в Приморье. В целом для территории России относительное изменение максимума интенсивности осадков растет с юга на север. В южных районах — наряду с горными кластерами Кавказа и Алтая — значительное относительное увеличение максимума интенсивности осадков ожидается в верховьях Амура (20 % и более).

С точки зрения оценки последствий важно иметь представление об изменении такого показателя как сезонный максимум сумм осадков в течение непрерывно продолжающегося влажного периода (рис. 7.2д). Наибольшее относительное увеличение данного показателя, составляющее в среднем около 30 %, ожидается на территории Сибирского ФО. Область этого увеличения простирается на юг вплоть до Байкала.

В холодный сезон максимальная продолжительность влажного периода увеличится к середине XXI в. практически на всей территории России (рис. 7.2б). В наибольшей степени это увеличение проявится на прибрежных территориях азиатской части Арктики, а также в горных районах Южной Сибири, и составит в среднем около 3 дней.

Значительным и повсеместным будет увеличение максимальной суточной интенсивности осадков: на севере ЕЧР относительное увеличение составит около 20 %, а в азиатской части Арктической зоны максимумы интенсивности предположительно вырастут более чем на 100 % по сравнению с концом XX в. (рис. 7.2г). Наиболее выраженные изменения касаются такой характеристики экстремальности осадков как максимальная сумма осадков в течение влажного периода (рис. 7.2е). Относительные изменения этого показателя на большей части территории страны превысят 40 %, а в прибрежных районах Арктической зоны увеличение максимальных сумм осадков за влажный период составит более 100 % от базовых значений.

Оценка статистической значимости изменения годовых максимумов суточных сумм осадков и температуры воздуха при использовании различного числа членов прогностического ансамбля показала, что для уверенного выявления изменения экстремумов осадков формирование большого ансамбля расчетов является критически важным. При использовании 15 членов ансамбля, т. е. 150 годовых реализаций, регистрируемые изменения на значительной территории России сопоставимы с естественной изменчивостью. Для обнаружения изменения температурных экстремумов требования к числу членов ансамбля не столь высокие. Но даже в этом случае привлечение к анализу 50 членов ансамбля дает возможность уменьшить область неопределенности оценок изменений по знаку в азиатской части АЗРФ.¹⁰⁷

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В контексте адаптации к изменениям климата для оценки рисков и оптимизации принимаемых решений на региональном уровне важно представлять, с какой вероятностью на выбранном временном интервале можно ожидать то или иное значение рассматриваемого индикатора. Массовые ансамблевые расчеты (500 годовых реализаций) дают возможность оценить будущие изменения рассматриваемых показателей в вероятностном аспекте.

¹⁰⁷ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология, № 3, с. 11—23.

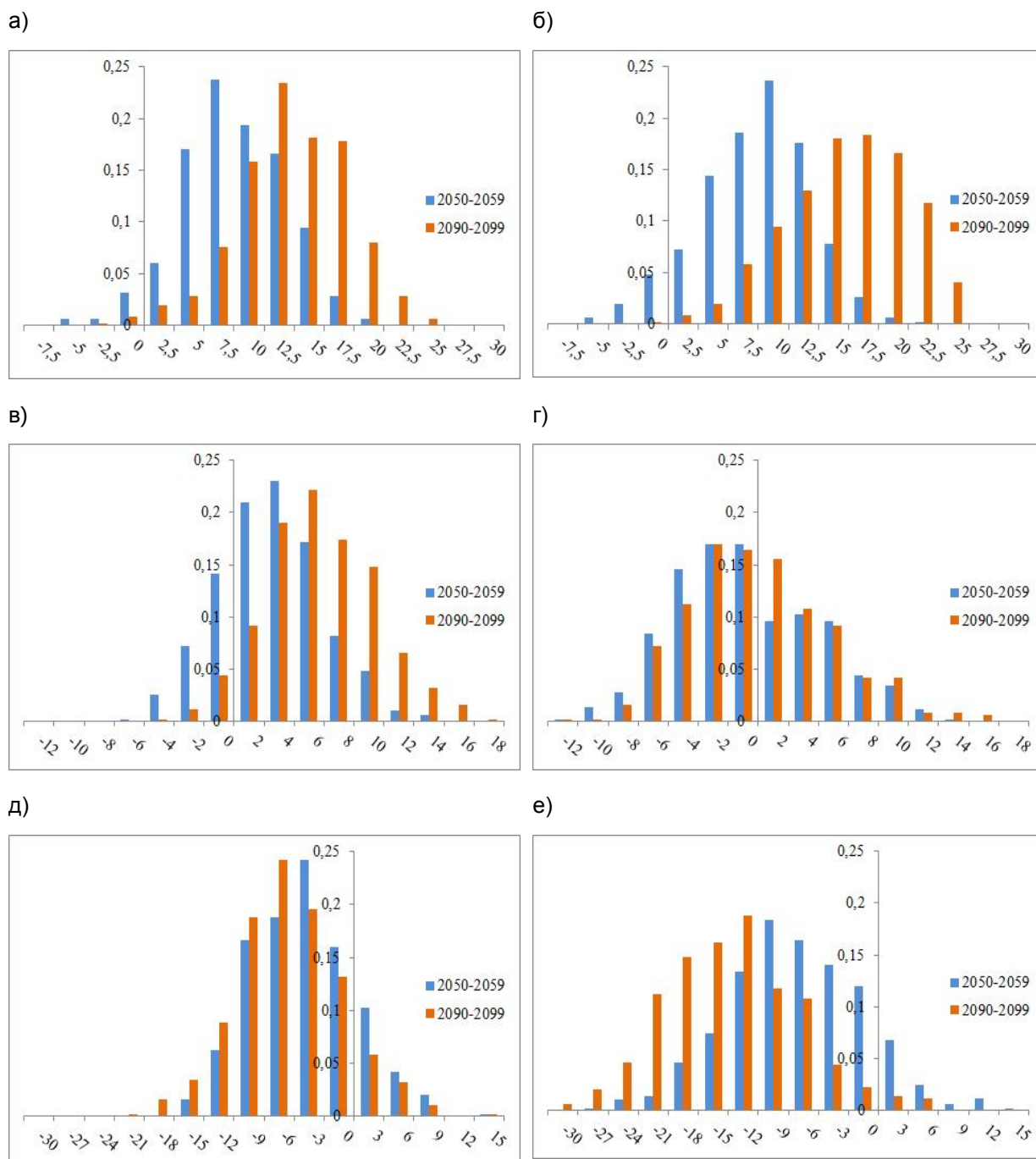


Рис. 7.3. Вероятностные распределения отклонений (°C) годовых индикаторов экстремальности температуры воздуха в 2050—59 гг. и в 2090—99 гг. от их средних значений в 1990—99 гг. в различных регионах Арктической зоны РФ (слева — Нарьян-Мар, справа — Хатанга):
а, б — годовой минимум; в, г — годовой максимум; д, е — годовая амплитуда.

На рис. 7.3 демонстрируются вероятностные распределения ожидаемых изменений для трех температурных показателей в различных регионах Арктической зоны РФ. Годовые минимумы уже к середине XXI в. и в Нарьян-Маре, и в Хатанге с вероятностью более 95 % превысят их среднее значение для конца XX в. В то же время особенности изменения годовых максимумов в Ненецком автономном округе и в Таймырском районе существенно различаются.

Если в Нарьян-Маре к середине XXI в. максимумы могут быть меньше современной нормы с вероятностью менее 10 %, то в Хатанге эта вероятность превышает 40 %. Соответственно уменьшение годовых амплитуд в Нарьян-Маре выражено менее, чем в Хатанге (вероятность превышения нормы конца XXI в. примерно 35 % в Нарьян-Маре и около 10 % — Хатанге). Сравнение распределений изменения годовых максимумов для середины и конца XXI в. 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.

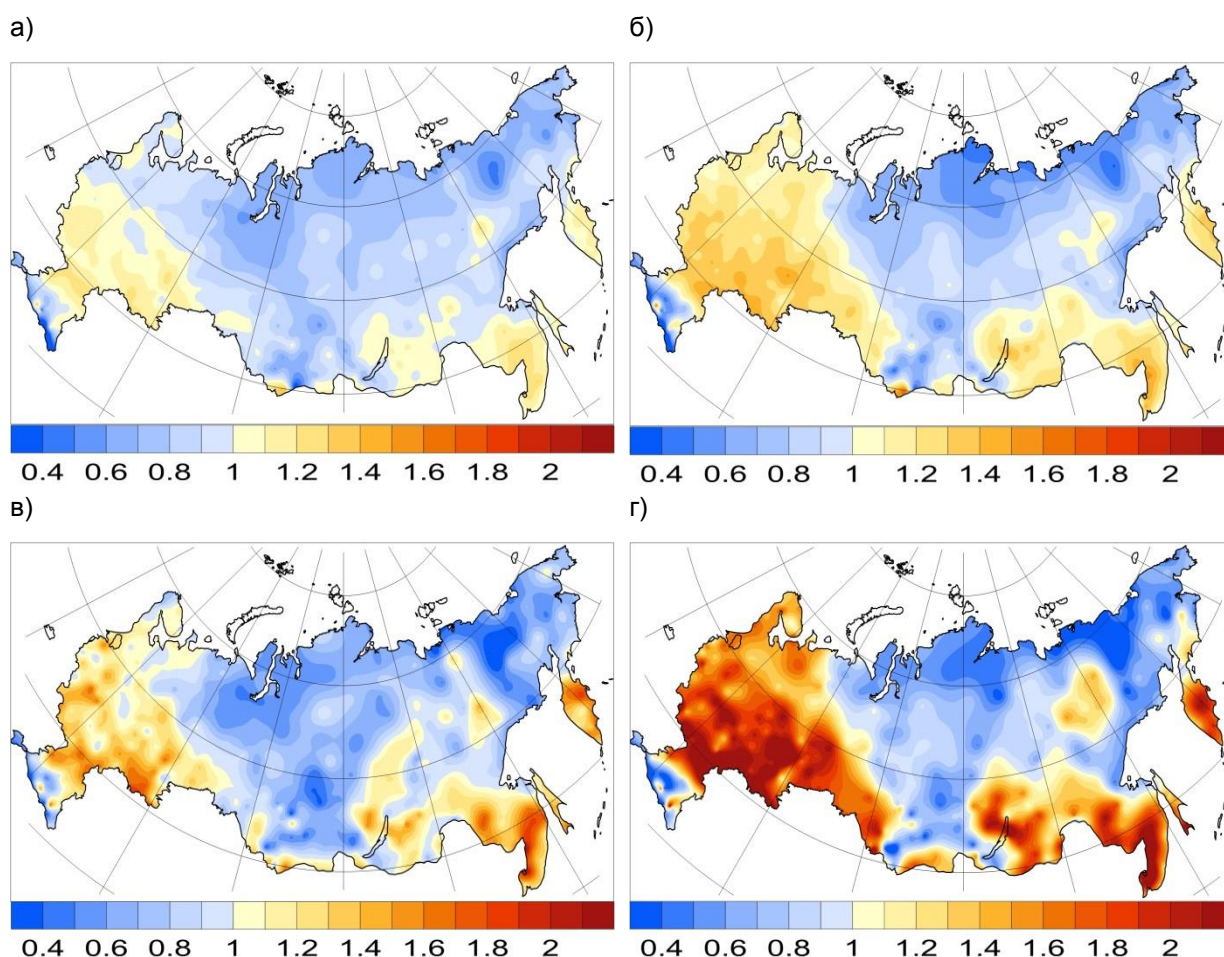


Рис. 7.4. Изменение частоты превышения различных уровней для максимальной продолжительности сухого периода теплого сезона (д—з) в 2050—59 гг. (слева) и в 2090—99 гг. (справа) по отношению к 1990—99 гг.:
а, б — относительное изменение доли лет со значениями, превышающими 50-й процентиль базового периода; в, г — то же для 90-го percentиля.

Изменение формы распределения наиболее важно учитывать для характеристик режима увлажнения, и применительно к экстремально высоким значениям сумм осадков этот вопрос заслуживает специального обсуждения. Для адаптации и эффективного функционирования генерирующих объектов в энергетике важной также является детализация представлений о будущих изменениях показателей, связанных с периодами дефицита осадков в теплый сезон.

Согласно модельным оценкам,¹⁰⁸ к середине XXI в. ожидается увеличение средних значений максимальной непрерывной продолжительности сухих периодов в центральных и южных районах ЕЧР и прилегающих районах Западной Сибири, а также в Приамурье, Приморье и на Камчатке. В дальнейшем, к концу века, частота продолжительных сухих периодов, вероятность которых в конце XX в. составляла 10 %, увеличится в критических областях в 2 и более раз (рис. 7.4). На юго-востоке ЕЧР, в частности, в Волгоградской обл., будут отмечаться экстремально продолжительные сухие периоды, превышающие современные средние более чем на 1 месяц.¹⁰⁹

Для обеспечения достаточного уровня надежности существующих и проектируемых объектов (зданий, сооружений, автомобильных и железных дорог и пр.) необходим своевременный анализ будущих изменений в режиме экстремально высоких температур, а также корректная оценка сохраняющихся рисков, связанных с экстремально низкими температурами. Для экстремумов различных показателей, соответствующих периодам повторяемости 10 лет и менее, изменение частоты их повторения может быть оценено на основе анализа имеющихся результатов массовых ансамблевых расчетов.

К числу важных индикаторов экстремальности теплого сезона относится температура наиболее жаркого периода заданной продолжительности (1 сутки, 5 суток, 1 декада, 1 месяц). Система таких индикаторов характеризует возможную интенсивность температурных воздействий разной длительности. Вероятностный анализ ансамблевых расчетов для температуры наиболее жаркого месяца (рис. 7.5) показывает, что согласно сценарию RCP8.5 к середине XXI в. на ЕЧР значения этой величины, превышающие 50-й процентиль конца XX в., будут наблюдаться практически ежегодно (увеличение частоты данного уровня близко к 2). При этом в южных районах ЕЧР ежегодные значения температуры наиболее жаркого месяца превысят 90-й процентиль конца XX в., а на остальной территории частота превышения этого уровня увеличится примерно в 5 раз, т. е. соответствующие значения будут наблюдаться в среднем через год.¹¹⁰

АЧР отличается высокой степенью неоднородности территории по скорости потепления в летний сезон (рис. 7.5). В южных районах Сибири, в Приморье, а также на прибрежных территориях дальневосточных морей ожидаются изменения, близкие к тем, которые характерны для ЕЧР. В то же время в АЧР остается значительная территория, где не предвидится существенного увеличения летних экстремумов даже к концу XXI в.

¹⁰⁸ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М., 2019: Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология, № 7, с. 5—16.

¹⁰⁹ Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н. и др., 2019: Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 593. с. 6—52.

¹¹⁰ Катцов В. М., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2020: Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике РФ // Метеорология и гидрология, № 5, с. 46—58.

Вероятностные характеристики изменения летних температурных экстремумов наглядно демонстрируют основные особенности процесса антропогенного потепления в разных регионах России в ближайшие десятилетия с учетом вклада внутренней климатической изменчивости.

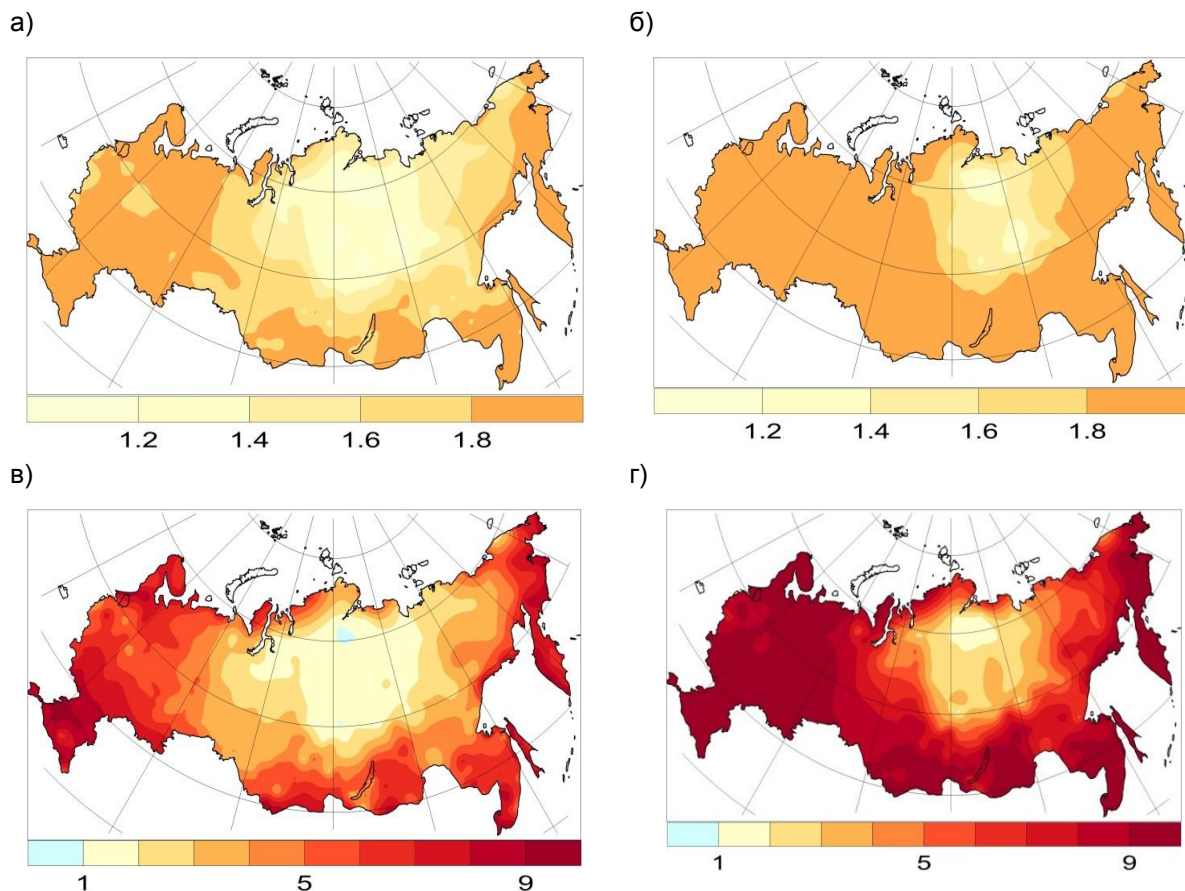


Рис. 7.5. Изменение частоты превышения различных уровней для температуры наиболее жаркой 30-дневки в 2050—59 гг. (слева) и в 2090—99 гг. (справа) по отношению к 1990—99 гг.:

а, б — относительное изменение доли лет со значениями, превышающими 50-й процентиль базового периода;
в, г — то же для 90-го процентия.

Существенные различия в характере потепления между ЕЧР и АЧР, которые обнаруживаются в современных условиях по данным наблюдений (в особенности, при рассмотрении пространственно-осредненных оценок)¹¹¹ являются закономерными и подтверждают обоснованность сценарных прогнозов регионального климата.

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕДКИХ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

При рассмотрении вопроса о будущих изменениях характеристик редких экстремумов на территории России по отношению к средней суточной температуре воздуха различного периода осреднения¹¹² особое внимание уделяется экстремумам средней суточной и пентадной температуры воздуха. Одной из рассматриваемых

¹¹¹ Росгидромет, 2020.

¹¹² Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология, № 3, с. 11—23.

характеристик является температура наиболее холодной пятидневки повторяемостью 1 раз в 50 лет (т. е. квантиль распределения годовых минимумов пентадной температуры воздуха уровня 0,02), которая широко используется в российской практике строительного проектирования в качестве нормативного параметра.¹¹³

Статистическая интерпретация результатов моделирования с привлечением теоретических методов анализа экстремумов и процедуры «размножения» выборок¹¹⁴ дали возможность получить детализированное представление об изменении квантилей редкой повторяемости сезонных температурных экстремумов и мере неопределенности их оценок в XXI в. На основе результатов 10-летних экспериментов комбинаторными методами формировался статистический ансамбль различных 30-летних совокупностей, которые использовались для последующего расчета параметров обобщенного распределения экстремальных значений (GEV), квантилей редкой повторяемости (с привлечением GEV), а также средних многолетних значений рассматриваемых экстремумов. Такие расчеты были произведены для трех периодов: 1990—1999, 2050—2059. и 2080—2099 гг. В результате были получены статистические ансамбли оценок изменения характеристик экстремальности к середине и к концу XXI в. Для количественного описания возможных будущих изменений характеристик редких экстремумов рассчитывались процентиля распределения оценок изменений в ансамбле (5, 25, 50, 75, 95 %).

Анализ ансамблевых оценок температуры наиболее жаркой и наиболее холодной пентады 98 %-й обеспеченности (рис. 7.6) выявляет региональные особенности в изменении данных показателей экстремальности к концу XXI в. Как показывают медианные оценки, повышение минимальных температур редкой повторяемости ожидается на всей территории России (рис. 7.6б, г, е). При этом наибольшая скорость изменения отмечается на территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов, а также на прибрежных территориях азиатской части Арктики.

В летний сезон диапазон оценок ожидаемых изменений характеристик редких максимумов пентадной температуры воздуха включает в себя и отрицательную область. С вероятностью не менее 5 % отрицательные изменения возможны на обширной территории Красноярского края. Областью наибольшей неопределенности оценок по знаку изменения температурных максимумов является Таймырский район. Согласно медианным оценкам наибольшее повышение редких годовых максимумов к концу XXI в. ожидается на юге европейской части России, а также в южных районах Урала и Западной Сибири.

Оценки изменения характеристик экстремумов, аналогичные приведенным для пентадной температуры, получены и для средней суточной температуры воздуха. Выявляемые по этим данным региональные и сезонные закономерности практически не отличаются от представленных на рис. 7.6. Это связано с тем, что суточные экстремумы, как правило, регистрируются внутри экстремальной пентады.

¹¹³ Свод правил СП131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М.: Минрегион России, 386 с.

¹¹⁴ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология, № 3, с. 11—23.

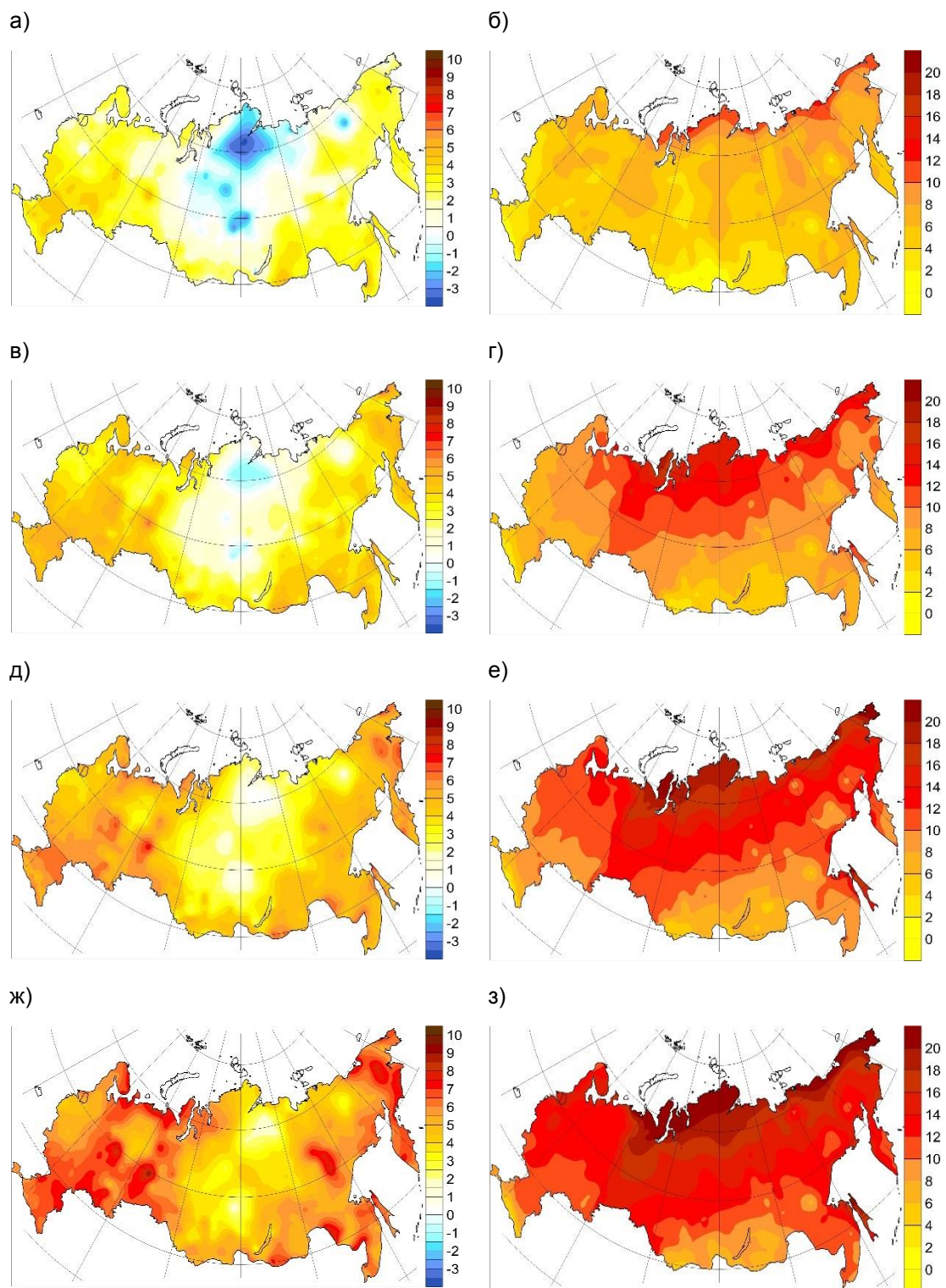


Рис. 7.6. Вероятностные оценки изменения (°C) температуры наиболее жаркой (а, в, д) и наиболее холодной (б, г, е) пентады 98 %-й обеспеченности к концу XXI в.: а — 5-й процентиль; б — 25-й процентиль; в — 50-й процентиль; г — 75-й процентиль.

Количественные оценки, характеризующие ожидаемые изменения экстремально жарких периодов большей продолжительности, демонстрируют тенденцию роста скорости изменения с увеличением продолжительности периода осреднения, которая наиболее отчетливо проявляется для 95-го процентиля полученных оценок. Этот эффект (опережающий рост интенсивности продолжительных периодов жары по сравнению с короткими) требует, по-видимому, дальнейшего изучения.¹¹⁵ Нельзя исключать вклад в оценки методических факторов, связанных, например, с качеством воспроизведения персистентности отдельными глобальными моделями.

В середине XXI в. отрицательные изменения в оценках квантилей редкой повторяемости экстремумов отмечаются как в теплый, так и в холодный период (рис. 7.7), хотя зимой их вероятность и невелика (до 15—20 % в южных районах Сибири и Дальнего Востока). 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 к нему районов. Согласно медианным оценкам, в первой половине XXI в. скорости изменения рассматриваемых показателей экстремальности близки (характерные значения — около 0,4 °C/10 лет). Эти величины заметно уменьшаются в областях неопределенности оценок изменений по знаку. При этом наименьшая область неопределенности оценок отмечается для средних сезонных максимумов (рис. 7.7б), а наибольшая — для квантилей редкой повторяемости (рис. 7.7е), зависящих не только от средних значений максимумов, но и от уровня их изменчивости.

Степень существенности ожидаемых изменений хорошо проявляется при анализе рисков опасных природных явлений и процессов, 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 усложняется.¹¹⁶ При стационарном климате знание функции распределения и задание периода повторяемости является достаточным для оценки вероятности наступления угрожающего события для любого временного интервала в будущем. В нестационарных условиях требуется привязка к определенному периоду, представляющему интерес с точки зрения потребителя, и соответствующая климатическая информация об ожидаемых изменениях в распределении экстремумов. Используемая технология сценарного прогнозирования регионального климата дает возможность произвести вероятностную оценку рисков различных неблагоприятных событий, связанных с изменением климатических показателей экстремальности.¹¹⁷

¹¹⁵ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология, № 3, с. 11—23.

¹¹⁶ Rootzén H., Katz R. W., 2013: Design life level: Quantifying risk in a changing climate // Water Resour. Res., vol. 49, pp. 5964—5972.

¹¹⁷ Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019: Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология, № 3, с. 11—23.

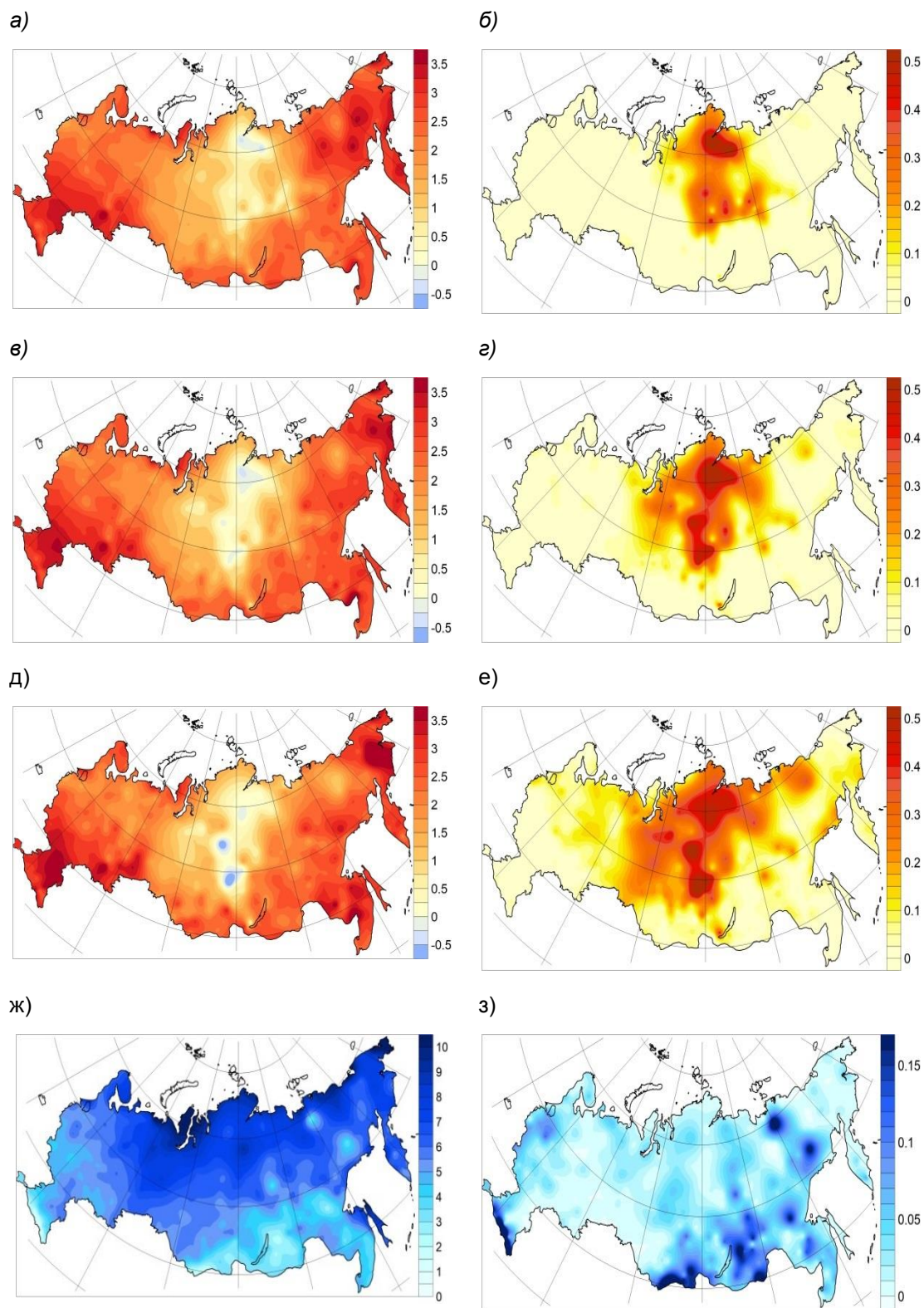


Рис. 7.7. Медианные оценки изменения (°C) характеристик распределения температуры наиболее жарких (а, в, д) и наиболее холодных (ж) суток к середине XXI в. и вероятности отрицательных изменений в ансамбле (б, г, е, з):

а, б — среднее значение; в, г — максимум 92 %-й обеспеченности;

д, е — максимум 98 %-й обеспеченности; ж, з — минимум 98 %-й обеспеченности.

Полученные результаты 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.

Выводы

Применение технологии вероятностного сценарного прогнозирования регионального климата дает возможность получить количественные оценки будущих изменений для широкого круга климатических показателей термического режима и режима увлажнения на территории России в XXI в., которые могут рассматриваться как информационная основа для разработки адаптационных программ в экономике России. Формирование большого ансамбля расчетов способствовало повышению достоверности полученных оценок и позволило уверенно диагностировать изменения для различных показателей, характеризующихся высоким уровнем естественной изменчивости (в первую очередь, для показателей экстремальности осадков).

Наряду с медианными ансамблевыми оценками изменения средних значений представлены результаты анализа будущих изменений климатических показателей в вероятностном аспекте. На примере основных характеристик экстремальности термического режима и режима увлажнения продемонстрированы основные региональные особенности процесса антропогенного потепления в ближайшие десятилетия с учетом вклада внутренней климатической изменчивости.

В современных условиях при организации планирования адаптации важно учитывать опасность, которая обусловлена доступностью разнообразных модельных данных широкому кругу потребителей, приводящую к увеличению риска некорректного использования этих данных в прикладных целях. С одной стороны, меры по адаптации к ожидаемым изменениям должны приниматься уже сейчас (т. е. адаптация должна носить упреждающий характер). С другой стороны, эти конкретные меры должны адекватным образом соотноситься с фундаментальной составляющей прогнозирования климата.

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 мульти-модельных ансамблях,¹¹⁸ 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

¹¹⁸ Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П. и др., 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.

специальные вопросы статистической интерпретации модельных климатических данных для прикладных целей.¹¹⁹

Методология анализа воздействий изменения климата и разработки адаптационных программ, в рамках которой отправной точкой являются результаты климатического моделирования, применяется в большинстве исследований климатических воздействий. Такая методология обычно называется подходом «сверху вниз» («top-down»). При альтернативном подходе («bottom-up») первоочередное внимание уделяется анализу на локальном уровне социально-экономических факторов, способствующих или препятствующих реагированию на происходящие изменения.¹²⁰ Исследования уязвимости населения начинаются с анализа существующих ограничений в социальных системах (например, бедность, социальное неравенство), которые могут увеличить уязвимость к изменению климата или стать препятствием для адаптации. Этот подход полезен для выявления важных социально-экономических факторов и текущих проблем, которые необходимо будет учитывать в процессе адаптации к изменению климата.

Оценки «сверху вниз» и «снизу вверх» имеют разные сильные и слабые стороны. Интегрирование этих подходов может помочь избежать некоторых недостатков. Исследования, нашедшие отражение в докладах МГЭИК¹²¹, в определенной степени объединяют оба подхода. Тем не менее, для лучшей привязки оценок к рассматриваемым пространственно-временным масштабам необходимо дальнейшее развитие методов, обеспечивающих включение обоих подходов («сверху вниз» и «снизу вверх») в процесс принятия решений.¹²²

¹¹⁹ Катцов В. М., 2015: Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / В сб. Труды VII Всероссийского метеорологического съезда — СПб: Д Арт. с. 66—80.

¹²⁰ Prutch A., Grothmann T., McCallum S., Schauser I., Swart R., 2014: Climate Change Adaptation Manual: Lessons learned from European and other industrialised countries. — Routledge, 352 p.

¹²¹ IPCC, 2014a: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability/ Part A. Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp;

IPCC, 2014b Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability/ Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.

¹²² Decision Making under Deep Uncertainty. From Theory to Practice, 2019: Marchau V., Walker W., Bloemen P., Popper S. W. (eds.). — Springer, 405 c.

8. ОБОСНОВАНИЕ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Адаптация к климатическим изменениям — это процесс приспособления к существующему или ожидаемому климату и его воздействиям. В антропогенных системах целью адаптации является уменьшение или предотвращение ущерба или использование благоприятных возможностей. В некоторых естественных системах вмешательство человека может способствовать приспособлению к ожидаемому климату и его воздействиям.¹²³

Национальные адаптационные планы, разработанные в различных государствах, значительно отличаются друг от друга в зависимости от уровня развития стран, приоритетов государственной политики в области изменения климата, степени подверженности экономики и социальной сферы к погодно-климатическим рискам. Однако анализ этих планов позволяет выделить пять наиболее общих основных стадий адаптационного процесса:

1) определение потребностей в адаптации (анализ современных и будущих погодно-климатических рисков, установление допустимых значений рисков с учетом экономических и социальных факторов, оценка уязвимости населения и хозяйственных объектов, их адаптационного потенциала и т. д.);

2) определение комплекса мер для различных вариантов адаптации;

3) экономическая оценка этих вариантов;

4) планирование и реализация выбранных адаптационных мер на федеральном уровне и на уровне субъектов федерации;

5) мониторинг и оценка хода реализации и результатов адаптации, внесение необходимых коррективов в осуществляемые меры.

В общем виде итерационный характер адаптационного процесса может быть представлен в виде цикла: от сбора и анализа базовой и специализированной информации следует двигаться к оценке современных и будущих рисков и появляющихся возможностей; затем наступает этап разработки мер адаптации и мониторинг ее результатов. На основе вновь полученных климатических и социально-экономических данных предполагается выход на следующий виток адаптационного процесса.¹²⁴ Реализация всех стадий адаптационного процесса должна сопровождаться тесным взаимодействием поставщиков и потребителей климатической информации, включая лиц, принимающих решения.

Каждый этап разработки как отдельных адаптационных мер, так и плана адаптации к климатическим изменениям на государственном уровне имеет свои особенности и может представлять значительные трудности при его реализации. Для преодоления этих трудностей и достижения наиболее эффективного результата следует детально изучить цели и задачи отдельных этапов и выбрать наиболее оптимальные пути их решения.

¹²³ IPCC, 2014a.

¹²⁴ Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П., 2015: Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Издательство Кириллица», 256 с.

Первым этапом адаптационного процесса является сбор базовой климатической информации. Для того, чтобы полученные данные обладали высоким качеством и необходимым временным и пространственным разрешением, требуется существенная модернизация государственной наблюдательной сети климатического мониторинга. Кроме того, в последние годы ВМО уделяет значительное внимание использованию для решения практических задач так называемых больших баз данных («big data»). Эти базы формируются не только на основе данных национальных гидрометслужб, но и включают результаты наблюдений дорожных служб, метеослужб аэропортов, судовые наблюдения, спутниковые данные и т. д. В связи с тем, что такие наблюдения проводятся по различным методикам и имеют разные форматы хранения данных, для объединения их в одну базу требуются дополнительные усилия и специально разработанные методы («краудсорсинг», нейронные сети, кластерный анализ и т. д.). Тем не менее, использование больших баз данных является перспективным направлением обработки и анализа данных и уже нашло свое применение в различных отраслях, прежде всего в экономических исследованиях.

На основе сформированных массивов базовой климатической информации производится расчет специализированной климатической информации, необходимой для решения конкретной практической задачи: проектирования инфраструктуры, оценки погодно-климатических рисков для населения или экосистем и т. д.). Для успешного решения этой задачи требуется детальный анализ нормативных документов, содержащих перечни и методы получения расчетных климатических параметров. Несмотря на то, что система специализированных климатических показателей нуждается в дальнейшем совершенствовании и более полной интеграции в нормативные и технические документы (СП и др.), в ней нашли отражение основные особенности влияния меняющегося климата на объекты экономики и социальной сферы. Поэтому данная система является отправным пунктом для разработки адаптационных мер. Ключевым условием для эффективных действий на данном этапе становится тесное взаимодействие с пользователями специализированной климатической информации (проектировщиками, экологами, МЧС, медицинскими работниками и т. д.).

Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата предъявляют особые требования к обработке климатической информации. В частности, возрастает необходимость более частого пересчета специализированных климатических параметров, входящих в нормативные документы, с учетом метеорологических данных за последние годы, а также введения в нормативные документы показателей, характеризующих изменение климата. Для оценки ожидаемых в будущем значений климатических параметров необходимо привлекать результаты климатического моделирования (см. раздел 6 «Сценарное прогнозирование изменений климата на территории Российской Федерации»).

На следующем этапе адаптационного процесса необходимо проанализировать изменения специализированных климатических параметров на рассматриваемой территории (для населения и каждого сектора экономики отдельно) и выявить те объекты и процессы, которые характеризуются наибольшей уязвимостью и будут подвержены максимальным рискам вследствие этих изменений (см. разделы 5 «Неблагоприятные проявления климатической изменчивости и их воздействия на экономику и население» и 7 «Ожидаемые изменения климатических воздействий на экономику и социальную сферу»).

Погодно-климатический риск может быть характерен для данной территории, если на ней наблюдаются опасные или неблагоприятные метеорологические и климатические явления и существуют субъекты или объекты (реципиенты риска), находящиеся под их воздействием и уязвимые к этому воздействию. В качестве реципиента риска может выступать население, территории, отрасли экономики, технические объекты и процессы, экосистемы. Методы идентификации и оценки погодно-климатических рисков на территории России рассмотрены в ряде работ.¹²⁵

Для оценки и управления рисками от медленных климатических изменений необходимы особые подходы, учитывающие их сложный характер и не всегда ясные механизмы взаимосвязи между ними. На Канкунской конференции по изменению климата (2010 г.) было принято решение относить к медленным климатическим изменениям подъем уровня моря, рост средней температуры воздуха, повышение кислотности океанских вод, таяние материкового льда, засоление почв, деградацию лесов и земельных угодий, уменьшение биоразнообразия, опустынивание. По своей природе эти изменения значительно отличаются от экстремальных климатических явлений и имеют долгосрочные и широкомасштабные последствия. При этом медленные изменения оказывают ощутимое влияние на частоту, интенсивность, пространственное распределение и длительность экстремальных явлений. Важным является тот факт, что в долгосрочной перспективе постепенные изменения могут затронуть значительно большее число людей, чем экстремальные явления. При оценке рисков от таких явлений их следует рассматривать в комплексе с рисками от экстремальных погодных явлений.

Одним из основных подходов для управления комплексными рисками является интегрированный подход, сочетающий кратковременное и долгосрочное планирование действий по уменьшению негативных последствий климатических изменений. При этом необходимо оценивать совместное действие медленно текущих климатических изменений и экстремальных погодных явлений на рассматриваемые объекты. Примером такого подхода может быть проект CliPLivE¹²⁶, который выполнялся в 2007—2013 гг. при участии гидрометеослужб России и Финляндии. Исследования были направлены на анализ комплексного воздействия повышения уровня моря и увеличения повторяемости экстремальных скоростей ветра на эрозионные процессы на побережье Балтийского моря. Оценка комплексного риска для береговой инфраструктуры основывалась на матрице риска, включающей информацию о геологической, климатической и экологической составляющих риска для городской среды. В результате были определены и нанесены на карту четыре уровня комплексного риска для жилых массивов, промышленных предприятий, транспортной инфраструктуры, водоснабжения, лесного хозяйства и т. д. Полученные результаты могут служить основой для оценки будущего пространственного распределения величины природного риска для городской среды.

Рассматривая методику оценки комплексных рисков, следует подчеркнуть, что климатический риск, создаваемый несколькими ОЯ, часто не является суммой рисков этих ОЯ. Комплексный риск определяется на основе многомерных распределений, составляющих комплекс ОЯ или комплекс последствий. Этому предшествует исследование физической картины совместного воздействия нескольких возможных

¹²⁵ Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, 2017 — СПб: Климатический центр Росгидромета, 106 с.; Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П., 2015: Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере — СПб: «Издательство Кириллица», 256 с.

¹²⁶ Climate Proof Living Environment – Климатически устойчивая среда обитания.

ОЯ. Например, если требуется оценить риск «недотопы» здания, то помимо температуры следует учитывать также влияние ветра, о чем свидетельствует анализ воздействия метеорологических факторов на отопительный процесс. С этой целью следует составить матрицу двумерного распределения комплекса температуры и ветра, а также матрицу эффективной температуры. Их совместный анализ показывает, что наибольший охлаждающий эффект создает не самая низкая температура воздуха и не самый сильный ветер, а сочетание некоторых промежуточных значений температуры и ветра. Данное сочетание можно считать критическим. Вероятностное отклонение от него можно рассматривать как риск «недотопы» или «перетопы».

Следует также иметь в виду, что для многих ОЯ дополнительную серьезную угрозу представляет так называемый «вторичный» риск. Так, например, вторичный риск сильного дождя связан с последующими наводнениями, размывами насыпей железных и автомобильных дорог и т.д. При окончательной оценке рисков и принятии решения об адаптации вторичный риск также необходимо идентифицировать и принять в расчет, т. е. использовать системный подход к анализу рисков.

Следующий этап адаптационного процесса включают в себя собственно выбор адаптационных мер для конкретного экономического сектора (или региона) на основе перечня наиболее уязвимых объектов и процессов, относящихся к данному сектору, и результатов оценки современных и будущих погодно-климатических рисков. На этом этапе необходимо активное участие специалистов соответствующих министерств и ведомств, разрабатывающих нормативную документацию для данного сектора и ответственных за его развитие. Различные классификации адаптационных мер и основные принципы их планирования изложены в ряде работ.¹²⁷

Определение приоритетных мер, отвечающих интересам всех участников процесса, является одной из наиболее сложных задач. Большое значение для правильного определения потребностей в адаптации имеют объективные оценки суммарного влияния климатических факторов на различные сектора экономики.

Первым шагом в экономической оценке воздействия изменения климата на уровне страны является определение так называемых "полей воздействия".¹²⁸ Это могут быть как отдельные сектора экономики или части секторов, так и совокупности секторов. Поскольку поля воздействия часто имеют совершенно разный характер, механизмы воздействия изменения климата различны и, следовательно, разнообразны также методы расчета затрат и выгод от изменения климата. Следовательно, в зависимости от поля воздействия, применяются один или несколько методов оценки, учитывающих изменения в технологии производства и последующей структуре себестоимости производства, изменения в производительности, изменения в конечном спросе, изменения в инвестициях, изменения в государственных расходах и, наконец, уровень стоимости замещения. Применяя эти методы, можно получить прямые затраты для данного поля воздействия, которые вызваны непосредственно

¹²⁷ Катцов В.М., Порфирьев Б. Н., 2017: Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 586, с. 7—20; Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П., 2015: Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере — СПб: «Издательство Кириллица», 256 с.

¹²⁸ Steininger K. W., Bednar-Friedl B., Formayer H., König M., 2016: Consistent economic cross-sectoral climate change impact scenario analysis: Method and application to Austria // Climate Services. Published by Elsevier B.V. 14 pp.

климатическими последствиями (например, разрушение дороги из-за наводнения и связанные с этим затраты на ремонт).

Не менее важны и косвенные затраты, которые вызваны не самими физическими воздействиями, а их дальнейшими последствиями, т. е. негативными эффектами, которые влияют на всю экономику через межотраслевые связи. Если оценки прямых расходов, связанных с воздействием изменения климата, в принципе, относительно просты (например, через оценки расходов на реконструкцию или ремонтные работы), то косвенные расходы оценить сложнее. Современная экономика характеризуется высокой степенью специализации по всем видам деятельности и, одновременно, межотраслевого (межсекторального) взаимодействия. Обусловленный последним обстоятельством мультипликативный эффект оказывает значительное влияние на формирование совокупных затрат, выгод и конечного продукта. Для оценки межотраслевого (межсекторального) взаимодействия и мультипликативных эффектов используются модели межотраслевого баланса, учет климатического фактора в которых позволяет получить оценку его влияния на динамику и структурные параметры развития различных секторов и экономику страны в целом.

Методология оценки прямого и косвенного ущерба от ОЯ заключается в следующем.¹²⁹

Процедура оценки прямого ущерба от ОЯ включает три основных элемента:

- 1) классификация объектов, находящихся в зоне природного риска;
- 2) анализ последствий воздействия и оценка активов (характеристика состояния конкретных объектов после опасного воздействия и определение их стоимости);
- 3) анализ чувствительности реципиента (соотнесение масштаба ущерба и степени разрушительного воздействия сил природы).

Классификация объектов предполагает их объединение в однородные группы по критериям принадлежности к конкретной сфере производства или значимости для устойчивости функционирования самого производственного комплекса, а также обеспечения ключевых потребностей населения и государства с выделением критически важных звеньев. Например, в сфере социальной инфраструктуры такими звеньями являются системы жизнеобеспечения: водное, электрическое и газовое снабжение, канализация, сбор и удаление отходов, общественный транспорт.

Процедура оценки косвенного ущерба от ОЯ, который в общем виде выражается в сокращении выпуска и снижении совокупного спроса, включает два основных элемента.

Во-первых, оценка потерь от сокращения потребления и/или накопления предприятиями и домохозяйствами, непосредственно пострадавшими от бедствия и понесшими прямой ущерб. Эти потери обусловлены двумя причинами: приостановкой хозяйственной деятельности и необходимостью восстановительных работ.

Во-вторых, оценка потерь предприятий-поставщиков или предприятий-потребителей товаров (услуг) тех компаний, которые непосредственно пострадали от бедствия. Эти потери обусловлены также двумя причинами: неполучением указанной группой предприятий продукции или услуг от хозяйствующих субъектов, непосредственно пострадавших от бедствия, и неполучением указанной группой

¹²⁹ Порфирьев Б. Н., Макарова Е. А., 2014: Экономическая оценка ущерба от природных бедствий и катастроф // Вестник Российской Академии Наук, т. 84, № 12, с. 1059—107.

предприятий (домохозяйств) продукции или услуг от хозяйствующих субъектов, непосредственно пострадавших от бедствия, из-за нарушения технологических и/или логистических связей между ними.

Методику определения величины ущербов от изменения климата (без проведения адаптации) можно представить в виде следующей последовательности действий:

- определение экономической значимости каждого сектора экономики (например, его доли в национальном/региональном ВВП) и его подверженности климатическим факторам (например, для туристической отрасли важна характеристика погодно-климатических рисков в районах расположения зимних горнолыжных курортов);
- определение социально-экономических процессов (трендов), которые влияют на состояние отрасли (изменение экономической и демографической ситуации);
- определение основных климатических воздействий на сектор (например, изменение числа дней со снежным покровом) и соответствующих последствий (например, укорочение зимнего туристического сезона);
- определение одного или нескольких показателей чувствительности (например, снижение количества ночевок из-за более короткого зимнего сезона), которые могут быть переведены в экономические издержки (например, сниженные доходы от зимнего туризма);
- сбор данных о текущих воздействиях климатических показателей на отрасль для создания функции влияния на сектор (моделирования) или альтернативного применения оценок, полученных из других исследований;
- формирование функции ценности для перевода физических воздействий в экономические издержки или выгоды;
- определение влияния этих затрат или выгод на экономику в целом (в связи с изменениями производительности труда, структуры спроса, текущими или инвестиционными затратами).

Кроме рассмотренных выше прямых и косвенных материальных потерь существует и потери нематериальные. Материальные затраты относительно легко измерить, так как соответствующие активы или товары продаются на рынках и, таким образом, для них существуют какие-либо оценки, тогда как нематериальные убытки трудно измерить деньгами. Вопрос о том, является ущерб материальным или нематериальным, может привести к серьезным спорам среди заинтересованных лиц, так как он сводится к этическим принципам (например, цена человеческой жизни или психологической травмы, стоимость экосистем или объектов культурного наследия и т. д.).

После получения оценки всех видов ущербов от климатических изменений без проведения адаптации (или стоимости бездействия) можно переходить к анализу возможных адаптационных мер и оценки затрат на них и получаемых выгод как для одной отрасли, так и для экономики в целом. При этом используются известные экономические методы (метод затрат и выгод, метод эффективности затрат, метод оценки по множеству критериев и т. д.) (табл. 8.1).¹³⁰

Выбор того или иного метода обусловлен имеющейся исходной информацией, а также целями исследования.

¹³⁰ Risk Management Review. 2014. Risk Management and Decision progress Center. University of Pennsylvania. <https://riskcenter.wharton.upenn.edu/>

Таблица 8.1

**Применение экономических методов для принятия решений
с целью управления рисками и выбора адаптационных мер**

Метод	Возможности метода	Требования	Применение
Анализ затрат и выгод («затраты – выгоды»)	Выполняются строгие оценки на основе сравнения затрат и выгод	Необходима монетарная оценка всех выгод, что создает сложности в представлении нематериальных воздействий, таких как цена жизни	Проекты с большой степенью надежности и с четко определенными выгодами от их реализации (например, предотвращение риска наводнений)
Анализ «риск – эффективность»	Задается уровень приемлемого (допустимого) риска (бенчмарк), сравниваются эффективность затрат на достижение указанного уровня	Уровень риска задается нормативно и должен быть научно обоснован	Мероприятия с важными нематериальными последствиями, масштаб и/или глубина которых не должны превышать установленного норматива (опасности для жизни, здоровья людей и т. д.)
Многокритериальный анализ (в условиях неопределенности)	Рассматривается множество объектов как материальной, так и не материальной сферы под риском воздействия комплекса опасных (неблагоприятных) факторов, включая погодно-климатические	Требуется массив объективных (статистических) данных и значительный объем экспертных (субъективных) оценок	Крупные инвестиционные проекты, включая проекты регионального и федерального уровня

После проведения экономической оценки возможных адаптационных мероприятий происходит выбор эффективных мер с учетом рисков, затрат и выгод как материального, так и нематериального характера. В условиях значительной неопределенности будущего климата при составлении планов адаптации целесообразно концентрировать усилия, прежде всего, на мерах по уменьшению подверженности и уязвимости населения и объектов инфраструктуры, включая обновление нормативных документов, контроль над их выполнением, управление остаточным риском, например, системы раннего предупреждения, передача риска путем страхования и т. д.

Планы адаптации, составленные на разных уровнях (отраслевом, ведомственном, региональном и территориальном), должны быть согласованы между собой и быть взаимодополняющими. Адаптационные действия должны проводиться на самом подходящем для конкретных обстоятельств уровне.

На этапе реализации адаптационных планов необходим мониторинг заранее определенных количественных индикаторов результатов адаптационного процесса на местном, секторальном, региональном и национальном уровнях. Полезными также являются пилотные проекты по разработке адаптационных планов для конкретных отраслей экономики или регионов страны, при реализации которых возникает возможность выявить наиболее проблемные стадии адаптационного процесса, характерные для данного государства.

В качестве примера адаптации к изменению и изменчивости климата на отраслевом уровне может быть представлен комплекс некоторых адаптационных мер для энергетической отрасли, в частности меры для повышения надежности и эффективности функционирования АЭС и ТЭС.

Высокая уязвимость энергетической инфраструктуры к изменениям окружающей среды обусловлена, главным образом, ее длительным сроком службы, особенно в тех случаях, когда на этапе проектирования не учитывались воздействия, связанные с возможными климатическими изменениями. Долгосрочная инфраструктура, такая как АЭС и ГЭС, как правило, сложнее адаптируется к изменениям климата, тогда как объекты с более коротким сроком службы (например, многие агрегаты ВИЭ) могут быть заменены с меньшими затратами в связи с изменившимися условиями среды.

На основе анализа нормативных документов и общения с потребителями климатической информации в этой отрасли были определены основные риски для надежной работы АЭС и ТЭС, обусловленные, прежде всего, длительными периодами с высокими температурами воздуха и отсутствием достаточного количества воды нужной температуры, что может препятствовать нормальному режиму охлаждения энергоблоков электростанций, а также экстремальными скоростями ветра.

Для повышения надежности и эффективности этих систем необходим комплексный подход к адаптации, который будет включать технологические, поведенческие и институциональные меры.

Технологическая адаптация включает модернизацию и замену существующих систем электроснабжения, интеграцию энергоэффективных инфраструктур и технологий. Примеры мер по снижению уязвимости систем электроснабжения представлены в табл. 8.2.¹³¹

К технологической адаптации можно также отнести оптимальный выбор технологий для снижения уязвимости энергетических объектов. Так, например, уязвимость электростанций к изменению и изменчивости климата может быть значительно уменьшена при правильно выбранном типе используемой системы охлаждения АЭС и ТЭС. Моделирование спроса на воду и будущей доступности воды для электростанций в бассейне р. Эльба, в центральной Европе показало¹³², что электростанции с замкнутыми системами охлаждения менее чувствительны к изменениям температуры подаваемой воды, чем прямоточные системы, поскольку увеличение температуры окружающей среды на несколько градусов не оказывает существенного влияния на объем воды, требуемой для замкнутых систем охлаждения.

¹³¹ Как разработать Климатический план города? Опыт Москвы. Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. Москва, 2017, 44 с.

¹³² Markovic D., Koch M., 2014: Long-term variations and temporal scaling of hydroclimatic time series from the German part of the Elbe River basin // Hydrological Processes, vol. 28, pp. 2202—2211. <https://doi.org/10.1002/hyp.9783>

При этом в летний период объем воды, необходимый для прямоточных систем, может возрасти на 30 %. Для повышения устойчивости АЭС в наиболее потенциально опасных районах следует предусматривать создание резервных систем охлаждения (например, дополнительные резервуары воды и т. д.).

Таблица 8.2

Основные меры по адаптации системы энергоснабжения и обеспечению ее надежности

Основные направления	Мероприятия по обеспечению надежности, устойчивости и адаптации объектов системы электроснабжения
Техническое перевооружение и реконструкция электрических сетей	Более широкое применение передвижных электростанций и подстанций Строительство подстанций закрытого исполнения и минимальных размеров Освоение подземного пространства для размещения электросетевого хозяйства
Повышение управляемости процессов передачи и распределения электроэнергии	Применение схем с минимальным временем восстановления электроснабжения потребителей при возникновении аварийных режимов Постепенный переход к активно-адаптивным распределительным сетям (smart grid) Установка на электростанциях автономных источников генерации для пуска электростанции при потере связи с энергосистемой и автономного электроснабжения пиковых водогрейных котлов в аварийных режимах
Совершенствование принципов построения топологии сетей для повышения их пропускной способности	Выполнение низковольтных линий изолированными проводами, более устойчивыми к природным катаклизмам; применение сверхпроводящих кабелей; применение высокотемпературных проводов воздушных линий
	Разработка инвестиционных программ по внедрению централизованного хладоснабжения на базе тригенерации (процесс совместной выработки электричества, тепла и холода), применения термотрансформаторов и других видов установок Внедрение цифровых технологий в системах управления технологическими процессами и режимами Развитие ВИЭ на основе комплексной оценки эффективности таких источников для повышения гибкости системы энергоснабжения Повышение энерго- эффективности при генерации тепловой и электрической энергии и при их потреблении

Основные направления	Мероприятия по обеспечению надежности, устойчивости и адаптации объектов системы электроснабжения
Повышение эффективности управления производством и потреблением энергии	Специальная подготовка персонала для работы в условиях воздействия экстремальных климатических явлений, основанная на подходах экологического и энергетического менеджмента
	Повышение уровня производственной культуры и технологической дисциплины
	Разработка стратегии повышения потребительской ценности централизованной системы теплоснабжения на основе совершенствования организационно-экономических механизмов управления ею
	Создание стимулирующих механизмов для формирования финансовых резервов с целью покрытия убытков от климатических воздействий

При разработке методов технологической адаптации необходимо принимать во внимание структуру и динамику потребления энергоносителей, учитывая, что ТЭС и АЭС предоставляют потребителям как тепловую, так и электрическую энергию. Суммарный отпуск тепла от ТЭС за последние 20 лет сократился в России в 1,5 раза, а отпуск электроэнергии превысил докризисный уровень. Прежде жилищный фонд потреблял около 6—7 Гкал тепла и 550—600 кВт· час электричества на человека в год. Сегодня ЖКХ городов и городских поселений потребляют меньше тепла (4,5—5,5 Гкал на человека в год) и больше электроэнергии (850—950 кВт· час на человека в год). При этом, если суммарное потребление топлива на бытовые нужды почти не увеличивается и сохраняется в средней полосе России на уровне 1—1,1 т у. т. на человека в год, то структура энергопотребления меняется. Учитывая возможные климатические изменения, следует ожидать, что теплопотребление в дальнейшем снизится до уровня примерно 4 Гкал, а электропотребление значительно возрастет.

В последнее время существенно меняются параметры наружного воздуха в течение отопительного периода, растет амплитуда их колебаний. Анализ фактических климатических параметров наружного воздуха за последние 15 лет показывает, число градусо-суток отопительного периода для Москвы уменьшилось по сравнению с действующими нормами на 785 (16 %), а для Екатеринбурга на 517 (10 %).¹³³

Довольно существенно растут нормативы тепловой защиты, определяемые как общими рамочными нормами актуализированной версии СНиП «Тепловая защита зданий», так и утверждаемыми на региональном уровне территориальными строительными нормами. Климат и современная тепловая защита совокупно дают сокращение потребности в тепловой энергии примерно на 26—37 %»

Поведенческие меры охватывают большой спектр возможных действий по обновлению планов аварийного, эксплуатационного и технического обслуживания и подготовки кадров с целью минимизации риска в эксплуатации. Изменяя и улучшая

¹³³ Как разработать Климатический план города? Опыт Москвы. Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. 2017 — М.: Департамент природопользования и охраны, 44 с.

методы управления, возможно экономически эффективно снизить уязвимость агрегатов электростанций без каких-либо изменений в технологии. Поведенческая адаптация включает также большой набор мер по экономии электроэнергии и контролю потребления электроэнергии конечными пользователями. Адаптация конечных пользователей может значительно повлиять на уязвимость энергосистем в период тепловых волн, т.к. многие системы электроснабжения сталкиваются с отключением электроэнергии именно из-за повышенного спроса. Так, например, smart-счетчики могут отмечать потребление энергии ежечасно и позволять пользователю отслеживать его. Эта информация может стимулировать пользователей экономить электроэнергию и снижать собственные затраты, а также обнаруживать неисправное оборудование, которое потребляет значительное количество электроэнергии и исправлять или заменять его.

В настоящее время во многих городах России довольно активно идет работа по капитальному ремонту жилого фонда, в ходе которой реализуется комплекс энергосберегающих мероприятий: модернизация инженерных систем и освещения, реконструкция ограждающих конструкций и замена окон на энергосберегающие, установка систем регулирования теплopotребления.¹³⁴

Институциональная адаптация относится к действиям, предпринимаемым руководителями всех уровней, и развитию межсекторального сотрудничества. Правительства и учреждения на международном, национальном, региональном и местном уровнях анализируют социально-экономические условия при принятии конкретных стратегий и в итоге определяют успех или неудачу адаптации.

На национальном уровне правительства могут устанавливать стандарты эффективности для сектора электроэнергетики, изменять строительные нормы, предоставлять качественную климатическую информацию, разрабатывать планы по управлению чрезвычайными ситуациями.

На региональном и местном уровнях правительства контролируют планы землепользования, которые дают им возможность изменять существующую инфраструктуру, заменять уязвимые системы и выбирать области для новых объектов по выработке электроэнергии.

Одна из важнейших институциональных мер — это диверсификация энергетических систем. Наличие альтернативных способов производства энергии может снизить уязвимость сектора в целом к определенному климатическому воздействию, поэтому вопросы энергетической безопасности (не только в контексте изменения климата) тесно связаны с уровнем диверсификации энергетической системы. Расширение спектра типов и видов электростанций в составе региональной энергосистемы и использование централизованных и децентрализованных энергоресурсов поможет увеличить доступность системы и ее устойчивость к более изменчивым климатическим условиям.

При подготовке качественной климатической информации с целью обеспечения надежного функционирования АЭС и ТЭС очень важна роль гидрометслужбы. В условиях климатических изменений необходимо проведение дополнительных гидрометеорологических исследований в районе расположения электростанций. Так, например, в случае регистрации в районе размещения АЭС экстремальных значений

¹³⁴ См., например: Как разработать Климатический план города? Опыт Москвы. Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. 2017. — М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. 44 с.

гидрометеорологических параметров необходимо проводить проверки не превышения проектных значений этих параметров. При выявлении превышений, принятых в проекте значений, следует проанализировать необходимость принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности АЭС.

Кроме того, целесообразны следующие мероприятия:

- актуализация нормативных документов для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС, содержащих климатические характеристики, с целью учета климатической информации за последнее 30-летие;
- организация мониторинга повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды, прежде всего смерчей, как одного из самых опасных метеорологических ОЯ для генераторов энергии, в первую очередь, для АЭС;
- учет возможного снижения мощности энергоблоков АЭС и ТЭС в летний период при планировании развития энергетической отрасли в районах наибольших климатических рисков (например, создание независимых энергоносителей, в том числе на базе ВИЭ).

Таким образом, потенциал адаптации энергетической отрасли необходимо рассматривать как динамичный показатель, требующий постоянного мониторинга и актуализации с учетом научных, технологических, экономических, социальных и других значимых факторов. Адаптация должна сочетать подходы «сверху вниз» и «снизу вверх», которые дополняют друг друга. Для достижения этого важны каналы коммуникации, диалога, обмена информацией и коллективных действий. Общей проблемой при разработке адаптационных стратегий для производства электроэнергии является ориентация на краткосрочные меры. Средне- и долгосрочное планирование часто затруднительно из-за ограниченности финансирования и высокой степени неопределенности, связанной со среднесрочными и долгосрочными прогнозами. Тем не менее, необходимо увязывать кратко-, средне- и долгосрочное планирование для гарантии того, чтобы планируемые меры не противоречили друг другу.

Меры по адаптации энергетики должны совместно разрабатывать сектора, тесно связанные с потреблением энергии и воды. Так, сектора экономики, зависящие от водных ресурсов, такие как сельское хозяйство, ЖКХ, промышленность, должны работать согласованно с электроэнергетическим сектором при использовании воды, особенно во время волн тепла. Отрасли, зависящие от электроэнергии, должны сотрудничать с электроэнергетическим сектором в целях повышения энергоэффективности и снижения пикового спроса, чтобы облегчить работу сети в целом и искать возможности для экономического развития без дальнейшего расширения электрических систем.

При переходе на региональный и локальный уровень реализация адаптационных мер, разработанных на отраслевом уровне, требует значительной корректировки с учетом местных климатических, физико-географических и социально-экономических условий, а также степени уязвимости объектов местной инфраструктуры. Тем не менее, основные направления секторальной адаптации должны быть учтены на уровне субъектов Российской Федерации с тем, чтобы не возникли нестыковки и противоречия в подходах к этому вопросу между соседними регионами, и появилась возможность адаптировать к климатическим изменениям данную отрасль в масштабах всей страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатическое обслуживание в России, осуществляемое российской гидрометслужбой (в настоящее время — Росгидрометом), имеет уже более чем вековую традицию. Отечественная климатическая продукция на протяжении XX столетия задавала высокий стандарт для всего мирового сообщества. 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. В то же время, накопленный Росгидрометом за многие десятилетия практический опыт, в том числе опыт взаимодействия с потребителями, понимание их запросов, а также опора на фундаментальную и прикладную науку остаются хорошим заделом для выхода климатического обслуживания в России на новый уровень.

До относительно недавнего времени климатическое обслуживание экономики исходило из неизменности климата — нестационарность климата, как правило, не учитывалась в нормативных отраслевых методиках. Усугубляющиеся изменения климата и растущий, в соответствии с запросом общества и экономики, государственный статус климатической информации, прежде всего сценарных прогнозов и их учет в нормативных документах и справочниках, требует значительных усилий в этом направлении. Необходимо обновление действующих климатических нормативов с привлечением современных данных и выходом на региональный уровень с учетом мезо- и микроклиматической изменчивости. В особом внимании нуждается количественная прогностическая оценка рисков и потерь, отражающая отраслевую специфику потребителя климатической информации, необходимая для принятия оптимальных адаптационных решений. Такая оценка должна стать важной предпосылкой действий государственных органов и субъектов экономики в области адаптации распределения рисков и управления рисками.

Основным ресурсом адаптации к изменениям климата является наука. Без постоянного мониторинга и оценки климатических воздействий, уточнения прогнозов, мониторинга эффективности принятых мер адаптации и регулярной корректировки планов адаптации — т. е. без глубоких и хорошо технологически (прежде всего, устойчиво функционирующей ГНС и супер-компьютерных ресурсов) и кадрово оснащенных фундаментальных и прикладных исследований — надлежащей упреждающей адаптации к изменениям климата не получится. При этом важнейшей составляющей научного обоснования мер адаптации являются экономические оценки.

Результаты научных исследований климата разумеется не исчерпывают потребностей адаптации. Необходим непрерывный диалог между профессиональными климатологами и субъектами адаптации, который мог бы способствовать надлежащему применению последними информации о климате при планировании и корректировке собственных адаптационных мер. Таким образом, императивом разработки и реализации стратегий и планов адаптации к изменениям климата является усиление межведомственного взаимодействия на федеральном и региональном уровнях, призванного обеспечить уменьшение дисбаланса между запросом государства, общества и экономики на климатологическую информацию и фактическими возможностями ее создания и предоставления.

Решение главной задачи климатического обслуживания — адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата — определяется решением следующих задач:

- информационно-аналитическое обеспечение процесса принятия решений по соответствующему кругу вопросов органами государственной власти Российской Федерации, органами местного самоуправления, хозяйствующими субъектами, включая вопросы развития нормативно-правовой базы и организации государственного регулирования в области адаптации к изменениям климата; развития экономических механизмов, связанных с реализацией мер по адаптации к изменениям климата, и др.;
- мониторинг новых отечественных и зарубежных технологий и опыта получения, сбора, передачи, хранения, представления климатической и связанной с ней информации и информационной продукции, необходимых при решении нормативно-правовых, научно-технических, экономических, военно-стратегических и других задач в области адаптации к изменению климата, с целью последующего внедрения в оперативную работу;
- разработка программ подготовки и повышения квалификации специалистов соответствующего профиля;
- информирование общества о происходящих и ожидаемых изменениях климата, их причинах и последствиях, возможностях адаптации к ним;
- содействие выполнению международных обязательств Российской Федерации в области мониторинга, оценки, прогнозирования изменений климата и их последствий, а также адаптации к ним, включая обязательства в рамках РКИК ООН.

Перечисленные задачи являются взаимосвязанными и взаимодополняющими, круг их может быть расширен.

Эти задачи предусмотрены Положением¹³⁵ о действующем распределенном ведомственном Климатическом центре Росгидромета, созданном в 2012 г. на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»¹³⁶ и решающим задачи по климатическому обслуживанию широкого круга потребителей, включая органы государственной власти Российской Федерации.

¹³⁵ <http://cc.voeikovmgo.ru/images/polCC.pdf>

¹³⁶ <http://cc.voeikovmgo.ru/images/p833.pdf>

КОМПОНЕНТЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА — СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОТРЕБНОСТИ РАЗВИТИЯ¹³⁷

НАЗЕМНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ РОСГИДРОМЕТА

Национальная климатическая (метеорологическая) сеть России (рис. П1.1) состоит из 775 обслуживаемых персоналом длиннорядных репрезентативных станций из состава ГНС. Это составляет в среднем по территории России около 50 % от функционирующей метеорологической сети с персоналом, (40—50 % на ЕЧР, 50—70 % на АЧР). 230 станций этой климатической сети функционируют 100 лет и более (64 из них относятся к ГСНК). Существующая национальная климатическая сеть, не подлежащая закрытию и сокращению объемов и программ метеорологических наблюдений¹³⁸, позволяет удовлетворить государственные нужды в климатической метеорологической информации для определения тенденций климатических изменений на территории страны, за исключением северных регионов на АЧР.

Выбор станций климатической сети на территории Российской Федерации основывался на следующих требованиях к пунктам наблюдений:

- равномерное распределение станций по территории Российской Федерации с учетом существующей плотности метеорологической сети на ЕЧР и АЧР;
- пропорциональное представительство информативно однородных в отношении метеорологического режима зон, т. е. каждая зона должна быть представлена как минимум одним пунктом метеорологических наблюдений;
- репрезентативность размещения пункта наблюдений;
- продолжительность рядов наблюдений более 30 лет;
- климатологическая однородность рядов наблюдений;
- качество и достоверность результатов наблюдений.

В программу работ всех 775 климатических станций входят следующие виды метеорологических наблюдений: температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, температура подстилающей поверхности, метеорологическая дальность видимости, высота нижней границы облаков, количество и форма облаков, количество атмосферных осадков, высота снега по постоянным рейкам, проведение снегосъемок, оценка степени покрытия окрестности снегом и состояния подстилающей поверхности, непрерывные круглосуточные метеорологические наблюдения за состоянием погоды, за атмосферными явлениями, в том числе неблагоприятными и опасными природными явлениями. Наличие наблюдателя на станции обязательно, т. к. не все существенные климатические параметры определяются инструментально.

¹³⁷ Это приложение основано на докладе Росгидромета «Переоснащение и модернизация Государственной наблюдательной сети климатического мониторинга», разработанного в рамках научного и информационного обеспечения реализации Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года (мероприятие 14 приложения к распоряжению Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р). Материалы представлены НИУ Росгидромета: Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова, Государственным гидрологическим институтом, Государственным океанографическим институтом им. Н. Н. Зубова, Институтом глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, Научно-исследовательским центром «Планета», Центральной аэрологической обсерваторией.

¹³⁸ Приказ Росгидромета от 23.03.2016 № 128

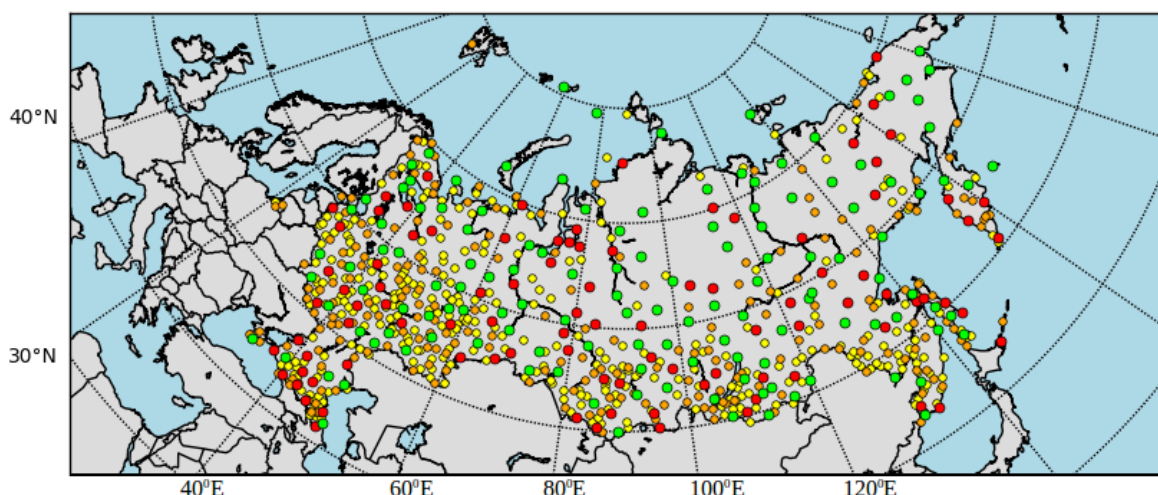


Рис. П1.1. Национальная климатическая (метеорологическая) сеть:
станции приземной климатической наблюдательной сети (ПСГ) ГСНК — зеленые кружки,
станции региональной опорной климатической сети (РОКС) — зеленые и красные кружки,
реперные (эталонные) климатические станции (РКС)¹³⁹ — зеленые, красные и оранжевые
кружки.

Из состава 775 климатических станций выделены 448 реперных климатических станций, предназначенных для определения глобальных и региональных тенденций изменений климата на территории России, из них в состав РОКС входит 231 метеорологическая станция (53 станции в РА-VI, Европа, 178 станций в РА-II, Азия).

Из 231 станции, входящей в РОКС, 132 станции являются приземными климатическими станциями ПСГ ГСНК (25 станций в РА-VI, Европа, 107 станций в РА-II, Азия). Продолжительность наблюдений на станциях ПСГ ГСНК составляет более 55 лет, а на 64 станциях — 100 лет и более.

Помимо обязательной для климатической сети программы наблюдений, на ряде станций выполняется расширенная программа наблюдений за следующими метеорологическими параметрами:

- интенсивность жидких атмосферных осадков (плювиограф, ручные измерения) — 316 станций;
- продолжительность солнечного сияния (гелиограф, ручные измерения) — 450 станций;
- температура почвы на глубинах (ртутные термометры, ручные измерения) под естественным покровом — 344 станции; на оголенном участке — 403 станции;
- гололедно-изморозевые отложения — 663 станции.

¹³⁹ Реперные (эталонные) климатические станции — метеорологические станции постоянного действия с непрерывным рядом однородных наблюдений не менее 30 лет, расположенные в местах, где изменения окружающей среды, вызванные деятельностью человека, минимальны и предназначенные для установления вековых тенденций изменений климата на освещаемой ими территории, а также для выявления неоднородности рядов наблюдений на станциях основной сети, обусловленной изменением условий на окружающей станцию местности или переносом станции. (Положение о реперных климатических станциях, Росгидромет, РД 52.04.720-2009)

Наблюдения за всеми стадиями развития метеорологических опасных явлений (ОЯ) и неблагоприятных гидрометеорологических явлений (НГЯ) на климатических станциях производятся непрерывно.

Кроме того, на 173 климатических станциях в программу наблюдений включены актинометрические наблюдения. Актинометрические наблюдения обеспечивают получение информации об одном из основных климатообразующих факторов — солнечной радиации, которая определяет термический режим атмосферы и подстилающей поверхности. По состоянию на 01.01.2020 г. только на 164 климатических станциях Росгидромета проводятся актинометрические наблюдения по трем различным программам:

- непрерывные измерения прямой, суммарной, рассеянной, отраженной радиации и радиационного баланса (регистрация);
- измерения мгновенных значений прямой, суммарной, рассеянной, отраженной радиации и радиационного баланса в 6 стандартных актинометрических сроках (срочные наблюдения);
- измерения суточных сумм суммарной радиации (интегрирование).

Различия в программах наблюдений обусловлены различиями в инструментальном оснащении станций. Этап модернизации актинометрической сети, осуществленный в 2011—2014 гг., не коснулся 150 актинометрических пунктов.

Основными проблемами функционирования климатической сети являются:

- проблемы с обеспечением функционирования автоматизированных средств измерения в регионах с неразвитой инфраструктурой;
- недостаточная квалификация кадров на наблюдательной сети;
- выработка технического ресурса автоматизированных метеорологических комплексов (АМК) и станций (АМС), поставленных в рамках проекта «Росгидромет-1», и выход из строя устаревшего и многократно выработавшего технический ресурс автономного оборудования;
- недостаток ремонтных комплектов для своевременной замены выходящих из строя комплектующих АМК и АМС.

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. Наблюдения на «вековых» береговых станциях осуществляются за уровнем моря, температурой воды, соленостью, за состоянием ледяного покрова, за толщиной льда у берега и на профилях. К системам наблюдений за параметрами водной среды и приповерхностного слоя атмосферы относятся так же 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), 17 станций — оперативные (интервал измерений 10—30 мин) включены в программу МОК ЮНЕСКО «Sea level

station monitoring facility» IOC/UNESCO. При этом для 10 пунктов GLOSS необходима модернизация и /или восстановление наблюдений за уровнем моря.

Наблюдения за характеристиками морского льда проводятся на береговых станциях и постах, данные собираются в двух мировых центрах WMO/IOC Global Sea-Ice Data (Российской Федерации и США). Наиболее длинные и репрезентативные ряды фактических наблюдений за метеорологическими и ледовыми параметрами накоплены на полярных гидрометеорологических станциях. Большинство станций ведут регулярные наблюдения с конца 1930-х — середины 1940-х гг. Таким образом, продолжительность рядов наблюдений за метеорологическими и ледовыми параметрами составляет на большинстве станций 70—80 лет.

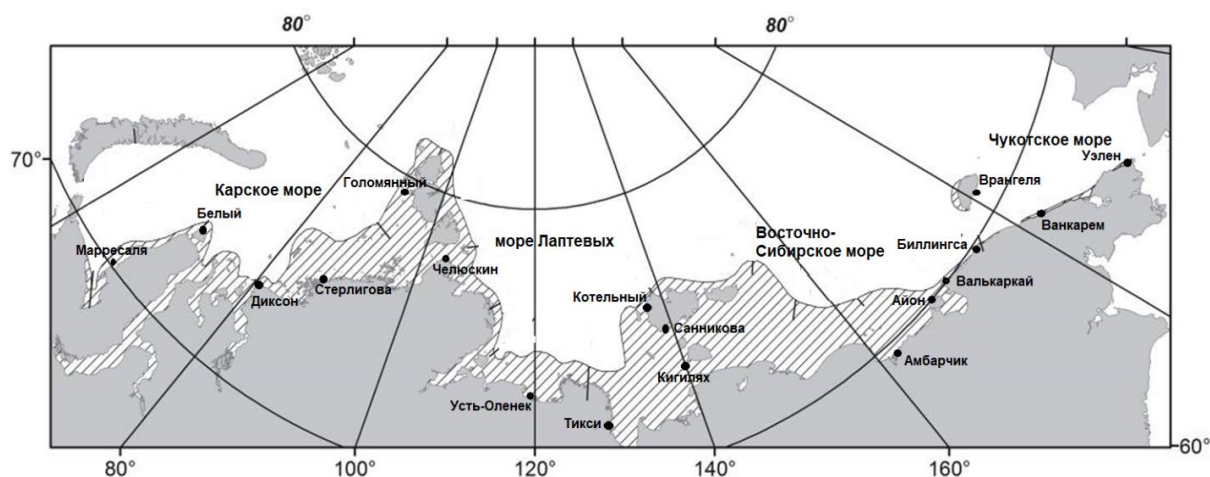


Рис. П1.2. Гидрометеорологические станции, действующие в арктических морях, положение при мая на период максимального развития в мае.

Состав морской реперной сети установлен и регламентирован нормативными документами. 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. В рамках развития и поддержания функционирования морской гидрометеорологической сети необходимо обеспечить:

- восстановление недействующих морских реперных пунктов наблюдений;
- контроль за сохранением состава сети действующих морских реперных пунктов наблюдений и программы наблюдений на этих пунктах;
- восстановление и развитие инфраструктуры, а также модернизацию средств измерений и передачи данных на сети действующих морских реперных пунктов, а также морской сети в целом;
- восстановление океанографических разрезов в океанах и морях;
- возобновление работы пунктов GLOSS, заявленных для участия в международной программе Глобальной системы наблюдений за уровнем моря и организацию передачи данных в центры сбора информации GLOSS в установленные международными правилами сроки;
- выполнение комплекса мероприятий по внедрению в практику морских наблюдений Росгидромета за уровнем моря Глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS для получения объективной информации о климатических изменениях уровня моря.

АЭРОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ РОСГИДРОМЕТА

Несмотря на значительный прогресс в развитии дистанционных методов зондирования атмосферы, аэрологическое радиозондирование во всем мире по-прежнему остается одним из основных источников информации о состоянии атмосферы от поверхности Земли до высот 30—40 км (предельных высот подъема радиозонда) для синоптического прогнозирования и климатического мониторинга. Аэрологические наблюдения на территории России проводятся в сроки 00 и 12 часов ВСВ и включают в себя температурно-ветровое радиозондирование атмосферы.

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

Для улучшения синоптического прогнозирования и климатического мониторинга в Арктике требуется восстановление и техническое оснащение, как минимум, 15-и станций температурно-ветрового радиозондирования. Необходимость выполнения данных мероприятий обусловлена недостаточностью развития аэрологической сети Арктического региона (количество действующих аэрологических станций в 1990-е годы сократилось с 24 до 9), физическим износом радиолокационных станций (РЛС), а также отсутствием оптимальных решений по построению автономных аэрологических станций из-за удаленности станций и сложных климатических условий.

Аэрологические станции в Арктическом регионе и на побережье Чукотского полуострова целесообразнее всего укомплектовывать аэрологическими радионавигационными комплексами (АРНК), для которых используются радиозонды с навигационными модулями. Для обслуживания и поддержания работоспособности этих комплексов требуется менее квалифицированный персонал, чем для РЛС, так как в АРНК для определения координат радиозонда используются данные глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Качество аэрологической информации получаемой при помощи АРНК на порядок выше, чем получаемой при помощи РЛС.

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ РОСГИДРОМЕТА

Гидрологическая сеть наблюдений предназначена для осуществления мониторинга поверхностных водных объектов суши (рек, озер, водохранилищ, крупных каналов, болот), включающего получение данных о состоянии водных объектов и количественных характеристиках водных ресурсов, необходимых для обеспечения запросов потребителей; изучения пространственно-временных закономерностей гидрологического режима, ведения государственного учета вод, водного кадастра, расчетов водных балансов и водных ресурсов водных объектов, отдельных бассейнов и районов, оценки влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и режим водных объектов.

Гидрологические наблюдения осуществляются на основной (реперной, рис. П1.3) и специализированной сетях. По состоянию на 01.01.2020 г. государственная гидрологическая сеть наблюдений насчитывает 2983 поста, из которых 2646 ведут наблюдения на реках и 337 — на озерах и водохранилищах. Количество реперных постов 1261, из них речных — 1135, озерных — 126.

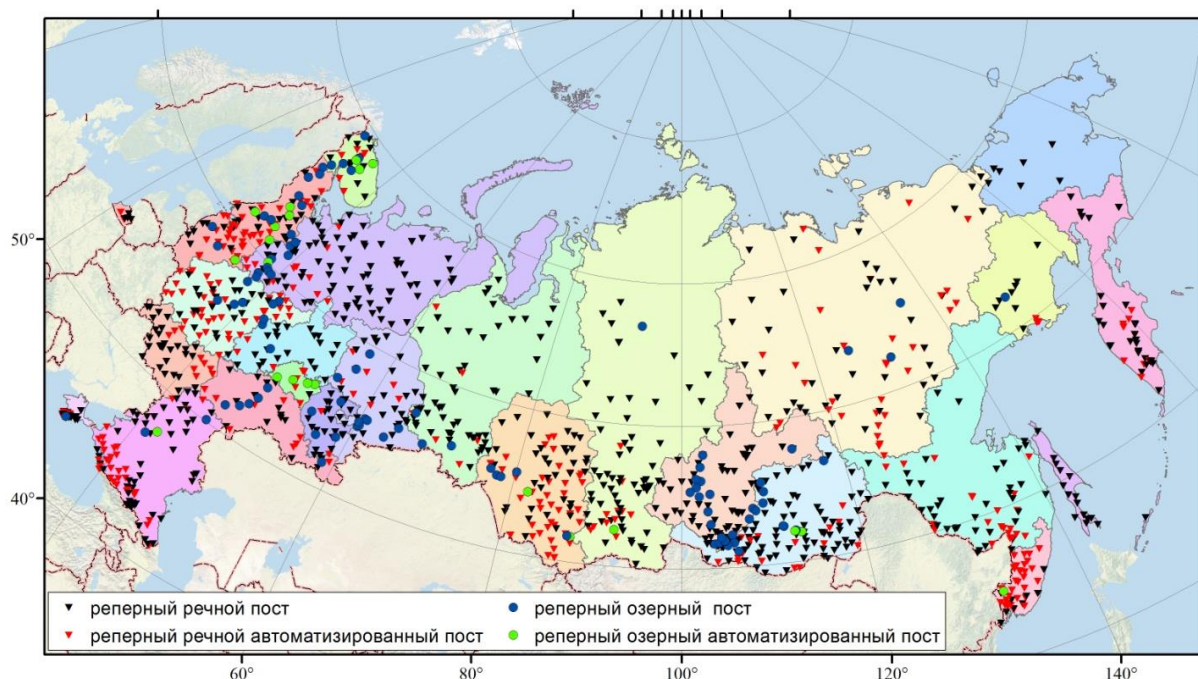


Рис. П1.3. Реперная гидрологическая сеть Российской Федерации.

Для решения задач изучения многолетних и вековых изменений гидрологического режима рек и водоемов под влиянием изменений климата и антропогенных воздействий из состава основной гидрологической сети выделено 1262 реперных поста с рядами наблюдений 60 и более лет. Требуется модернизация еще 887 постов, из них 782 речных, 105 озерных.

Для оценки влияния изменений климата на формирование гидрологического режима поверхностных водных объектов, испарения, влажности, режима подземных вод и иных компонентов водного баланса необходима модернизация пунктов наблюдений специализированной гидрологической сети: воднобалансовых и болотных станций и пунктов наблюдений за испарением с водной поверхности, почвы и снега. Это позволит оценивать реакцию элементов гидрологического цикла на климатические изменения.

В настоящее время наблюдения по ограниченному числу гидрометеорологических показателей проводятся 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.

При восстановлении пунктов наблюдений специализированной сети необходимо достичь следующих количественных показателей:

- восстановить программы наблюдений за различными гидрометеорологическими элементами на пяти водно-балансовых станциях;
- восстановить наблюдения за испарением: с водной поверхности — в 250, с почвы — в 200, с поверхности снега — в 150 пунктах.

С целью обеспечения мониторинга изменений теплового стока рек в моря российской Арктики целесообразно восстановить наблюдения за водным и ледовым

режимом рек Арктического региона, в том числе регулярные измерения расходов воды в замыкающих створах рек, с использованием аэрометодов на базе беспилотных летательных аппаратов.

СЕТЬ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТАВОМ АТМОСФЕРЫ РОСГИДРОМЕТА

Глобальная служба атмосферы (ГСА) ВМО предназначена для удовлетворения потребностей в проводимом на глобальном и региональном уровнях мониторинга химического состава и соответствующих характеристик атмосферы. Поскольку данные наблюдений ГСА ВМО служат для глобальных обобщений, станции этой Службы размещаются в местах, удаленных от непосредственного воздействия источников выбросов в атмосферу. Такая информация требуется для выполнения оценок антропогенного воздействия на окружающую среду, улучшения понимания поведения атмосферы и ее взаимодействия с океаном и биосферой, а также для прогнозирования будущего состояния земной системы. ГСА охватывает многие виды мониторинга и научной деятельности, включая высококачественные измерения состава атмосферы.

Программа ГСА содержит критически важный элемент обеспечения глобальной сопоставимости данных наблюдений за составом атмосферы путем передачи единицы измерений наблюдаемых параметров от мировых центров калибровки ГСА к национальным службам. В Росгидромете эта сторона деятельности станций ГСА обеспечивается по параметрам: углекислый газ, метан, общее содержание озона (ОСО), химический состав осадков (рис. П1.4).



Рис. П1.4. Станции ГНС, входящие в ГСА, а также станции наблюдения за атмосферным электричеством.

В России некоторые компоненты ГСА измеряются с 1950-х гг., например, ОСО. Наземная озонометрическая сеть Росгидромета включает 28 станций, выполняющих ежедневные измерения ОСО. Россия является крупнейшим поставщиком данных по ОСО в Мировой центр данных ВМО.

В последние годы 18 озонметрических станций были оснащены новыми автоматическими приборами отечественного производства. При этом сохраняется потребность в дальнейшем переоснащении наблюдательной сети и проведении работ для обеспечения официального признания структурами ГСА ВМО отечественного автоматического прибора.

В последнее тридцатилетие мониторинг основных метеорологических параметров постепенно дополнялся мониторингом наиболее значимых парниковых газов — в первую очередь, CO_2 и CH_4 . В настоящее время систематические измерения их концентраций в приземном слое атмосферы на соответствующем стандартам ВМО уровне выполняются на четырех станциях сети Росгидромета: Воейково, Териберка, Новый Порт, Тикси. Данные станций Териберка и Тикси, расположенных в условиях близких к фоновым, передаются в Мировой центр данных по парниковым газам ГСА ВМО.

Газоаналитическое оборудование, на котором выполняются измерения концентрации CO_2 , работает с 1988 г. Требуется модернизация аппаратно-измерительной базы. Более того, наблюдения за концентрацией только CO_2 и CH_4 не позволяют разделять вклад антропогенных и естественных источников в содержание парниковых газов в атмосфере. Для решения данной задачи требуется проведение измерений изотопной сигнатуры ^{13}C в составе CO_2 и CH_4 . Данный вопрос становится все актуальнее, поскольку информация об антропогенном влиянии на климат является главным аргументом в климатической политике в рамках РКИК в части осуществления мер по снижению выбросов парниковых газов. В настоящее время такие наблюдения в России не выполняются, но могут быть организованы в действующей лаборатории Росгидромета при условии приобретения соответствующего газоаналитического оборудования.

На антарктической станции Новолазаревская проводятся измерения содержания в атмосфере метана, углекислого газа (двуокиси углерода), окиси углерода, закиси азота и водяного пара по инфракрасным спектрам солнечного излучения.

Национальная сеть наблюдений за химическим составом и кислотностью осадков представлена 221 станциями, 10 из которых работают по программе ГСА ВМО. Основной метод наблюдений: отбор проб на станциях и их анализ в лаборатории Росгидромета. Результаты анализов направляются в Мировой центр данных ГСА.

Качество данных наблюдений контролируется со стороны ГСА ВМО по результатам выполнения анализа шифрованных проб, направляемых Мировым калибровочным центром в национальные лаборатории путем круговой рассылки.

Одним из направлений развития мониторинга химического состава атмосферы может стать контроль содержания черного углерода (частиц сажи) в атмосфере. Частицы сажи, попадающие в атмосферу, могут оказывать влияние на региональный климат (оценки этого влияния существенно разнятся), а также являются загрязнителем, представляющим опасность для здоровья населения. Поэтому, помимо фонового мониторинга, наблюдения за черным углеродом целесообразно организовывать и осуществлять в населенных пунктах со значительными выбросами этого вещества в атмосферу (например, при сжигании жидкого и твердого топлива).

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КРИОЛИТОЗОНОЙ

Многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) называют любой тип почвогрунта, температура которого остается отрицательной на протяжении двух или более лет подряд. Над ММГ располагается сезонно-талый слой (СТС), мощность которого меняется от нескольких десятков сантиметров в высокой Арктике до двух и более метров вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород. Границу между ММГ и СТС в геокриологии принято называть подошвой деятельного слоя. ММГ классифицированы по сомкнутости на сплошные (занимают более 90 % территории), прерывистые (50—90 %), островные (10—50 %) и редкоостровные (менее 10 %), причем две последние категории часто объединяют. В России на площади в 7 млн км² ММГ имеют сплошное распространение, на 1,8 млн км² — прерывистое и на 2,5 млн км² — островное и редкоостровное. Даже в сплошной зоне ММГ под водными объектами, не промерзающими до дна, существуют талики, т. е. грунты с положительной температурой.

Согласно рекомендации международной программы мониторинга мерзлоты GTNP, работающей под эгидой ВМО и Международной Ассоциации Мерзловедения, для мониторинга отклика ММГ на климатические изменения используются два параметра: мощность сезонно-талого слоя (СТС) и среднегодовая температура на подошве слоя годовых теплооборотов (на глубине нулевых амплитуд). Оба эти параметра рассматриваются ВМО в качестве основных климатических переменных. В России их измерения проводятся в рамках двух международных программ: CALM и GTNP. По программе CALM раз в год в конце теплого периода измеряется СТС на площадках 1 × 1 км через 100 м погружением в грунт щупа до упора. Из 68 площадок менее 20 имеют наблюдения длительностью более 10 лет. Особенность CALM в том, что площадки расположены хаотично и не репрезентативны, поскольку не охватывают весь спектр мерзлотных, ландшафтных и биоклиматических условий. Метеопараметры на них не измеряются, что обесценивает наблюдения СТС для моделирования. Планирование государственной сети наблюдений на основе CALM не целесообразно.

По программе GTNP проводятся геотермальные измерения в скважинах глубиной от 10 метров, оборудованных термокосами и логгерами записи данных. Полная база данных, включающая информацию более 160 российских скважин, размещена на портале проекта <https://gtnp.arcticportal.org/>. Эти измерения достаточно репрезентативны и охватывают сплошную, прерывистую и островную мерзлоту. Метеопараметры, как и в CALM, не измеряются. Кроме того, отсутствует единый стандарт обустройства скважин и предоставления данных. Таким образом, отсутствие единого собственника скважин затрудняет логистику и делает практически невозможным организацию сети Росгидромета на их основе.

Наиболее целесообразным представляется дооборудование существующих в криолитозоне метеостанций Росгидромета (около 140) современными приборами измерения температуры на стандартных глубинах до 3,2 м (рис. П1.5). Опыт GTNP показал, что эту задачу решают термокосы в сочетании с логгерами для записи данных в автономном режиме. Вблизи станций в типичных ландшафтных условиях целесообразно пробурить и оснастить измерителями температуры скважины глубиной не менее 10 метров. Интерполируя по вертикали получаемые данные, можно оценивать мощность СТС с точностью, не уступающей измерениям CALM.

При планировании сети следует учесть полный спектр мерзлотных условий (4 зоны с дифференциацией по ЕЧР, Западной и Восточной Сибири), растительную

зональность (не менее 5 типов растительности на мерзлоте), почвенные (с выделением в отдельную категорию торфяников), ландшафтно-топографические условия (низменности, равнины, предгорья, горы), а также пространственные закономерности современных изменений климата (не менее 5 регионов, однородных по этому показателю).

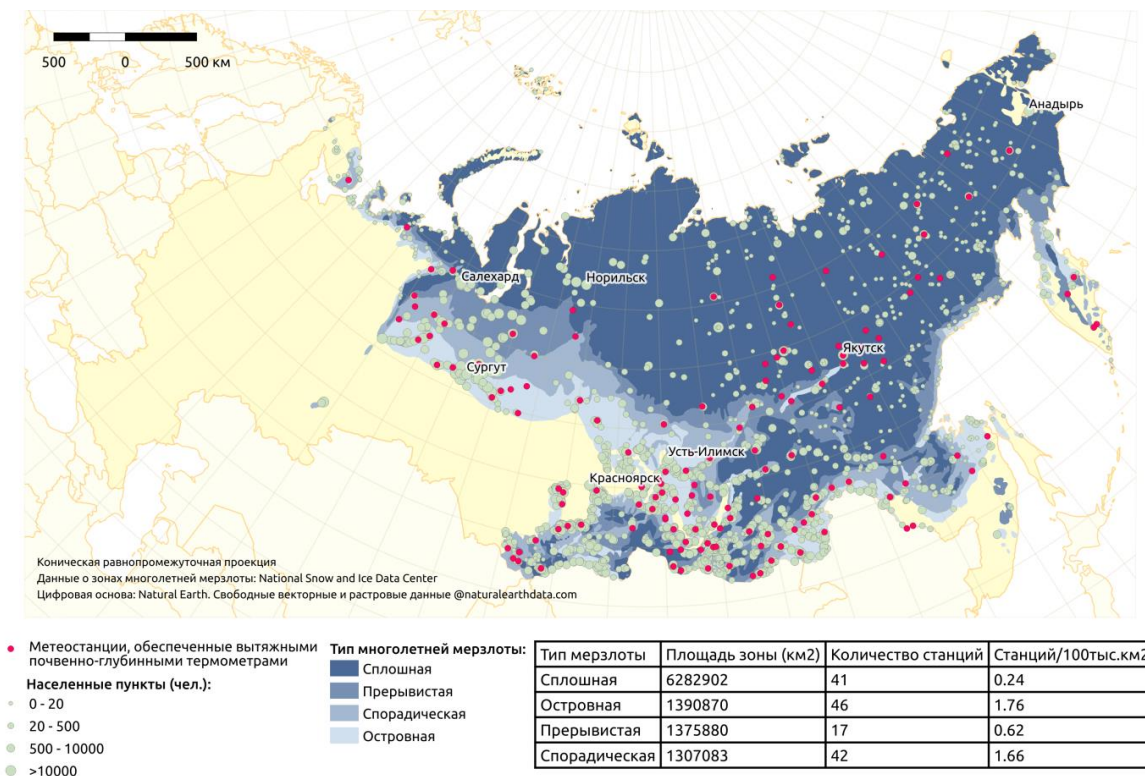


Рис. П1.5. Метеостанции, расположенные в зоне распространения ММГ и проводящие наблюдения за температурой почвы на глубинах.

Глобальная Система Наблюдений за Ледниками (GTN-G) основывается на наблюдениях, проводимых на гляциологических станциях. В Российской Федерации в международной программе Всемирной службы мониторинга ледников (World Glacier Monitoring Service, WGMS) участвуют: Институт географии РАН, МГУ, Томский Государственный Университет, Институт вулканологии РАН, ААНИИ Росгидромета.

ААНИИ проводит комплексные исследования ледников Арктики и Антарктики.

Одним из наиболее современных методов мониторинга и оценки состояния ледников является использование данных дистанционного зондирования (космические снимки). Однако эти данные обладают многочисленными погрешностями и нуждаются в верификации с применением натурных наблюдений. Учитывая разнообразие типов развитых в Арктике ледников, различия в их реакции на климатические флуктуации даже в пределах одной климатической провинции (например, ледники Северной Земли), разнообразие проводимых разными организациями видов наблюдений напрашивается систематизация сети и состава наблюдений за ледниками Арктической зоны Российской Федерации. Руководство решением такой сложной в логистическом отношении и финансово затратной задачи может взять на себя Росгидромет, чья наблюдательная сеть охватывает основные районы оледенения в Арктике.

В *организационном плане* целесообразно централизовать наблюдения за криосферой суши под руководством Росгидромета с участием заинтересованных организаций Минобрнауки, и сформировать на этой основе соответствующий компонент ГНС. Это потребует существенной научно-технической, методической и технологической проработки, начиная с создания концепции этого компонента ГНС и проекта его развития.

В качестве *финансовых механизмов* предлагается использовать опыт централизованного технического переоснащения ГНС. В качестве дополнительной следует изучить возможность привлечения бюджетов субъектов Российской Федерации, заинтересованных в соответствующем мониторинге. При этом финансирование со стороны субъектов Российской Федерации — недостаточный механизм, поскольку основная задача наблюдений за климатом имеет федеральное значение; подключение региональных бюджетов можно ожидать на цели детализации оценок локальных изменений климата в интересах конкретного субъекта Российской Федерации.

КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ

Росгидромет в настоящее время эксплуатирует отечественную группировку спутников метеорологического назначения, спутников мониторинга окружающей среды и спутников связи. Метеорологические спутники включены в состав Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (WMO Integrated Global Observing System, WIGOS).

Оперативные наблюдения проводятся с помощью трех космических аппаратов (спутников) гидрометеорологического назначения: полярно-орбитальных «Метеор-М» №2 и «Метеор-М» № 2-2 (запущен 5 июля 2019 г.) и геостационарного «Электро-Л» №2. В группу космических аппаратов природо-ресурсного назначения входят спутники серии «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Канопус-В-ИК». Получаемые со спутников данные используются, в числе прочего, для оценки антропогенных воздействий и частично решения задач в интересах исследования климата. Росгидромет проводит работы по подготовке рядов климатических данных (Climate Data Records, CDR) на основе спутниковой информации.

В инвентаризации источников и стоков парниковых газов непрерывность и глобальность обеспечиваются подходом, основанным на спутниковых наблюдениях. Важным направлением развития может стать также разработка и реализация отечественной программы спутникового мониторинга аэрозолей и малых газовых составляющих в тропосфере и нижней стратосфере.

Федеральными, отраслевыми и региональными показателями достижения целей адаптации к изменениям климата могут быть объективные оценки (по материалам космических наблюдений) изменения площадей объектов землепользования в результате предпринимаемых мер по их адаптации к изменениям климата. К таким объектам относятся леса, сельскохозяйственные угодья на которых осуществляется мелиорирование или ирригация, болотные экосистемы, речные и прибрежные морские территории и др.

В будущем предусмотрено создание космической гидрометеорологической системы, состоящей из трех геостационарных метеорологических спутников серии

«Электро», трех полярно-орбитальных метеорологических и одного океанографического спутника серии «Метеор», а также двух метеорологических спутников серии «Арктика». Создание указанных космических систем ведется в рамках Федеральной космической программы России, которая частично может решать задачи в интересах исследования климата.

Обмен спутниковыми данными с пользователями RA-VI (Европа) ВМО организован в соответствии с двусторонним соглашением между Росгидрометом и Европейской организацией по эксплуатации метеорологических спутников ЕВМЕТСАТ, заключенном в 1996 году.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА ОТДЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ (НА ПРИМЕРЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА)¹⁴⁰

ОТРАСЛЕВОЙ ПЛАН АДАПТАЦИИ

Отраслевой план адаптации (ОПА) предназначен для снижения уязвимости к последствиям климатических изменений путем повышения адаптационного потенциала соответствующего сектора экономики на федеральном уровне управления.

Процесс разработки и реализации ОПА включает следующие этапы:

1. **Проведение подготовительных работ и выявление факторов, препятствующих процессу адаптации сектора экономики.** Этот этап направлен на корректировку стратегии развития отрасли с учетом необходимости ее адаптации к изменениям и изменчивости климата. Для координации этого процесса целесообразно создание отраслевой межрегиональной рабочей группы с обязательным участием представителей Росгидромета. Мероприятия, проводимые на этом этапе аналогичны мероприятиям соответствующего этапа создания НПА.
2. **Подготовка основных компонентов ОПА.** На этом этапе особое внимание уделяется определению потребностей отрасли, возможностей и приоритетов адаптационных мер и координации их в целях устойчивого развития отрасли, включая:
 - анализ текущего состояния климатической системы и сценариев будущих изменений климата;
 - оценку подверженности и уязвимости отрасли и определение возможных вариантов адаптации отрасли (на основе их обзора и оценки) на местном, региональном, национальном и, возможно, международном уровнях;
 - составление и представление ОПА;
 - интеграцию плана адаптации к изменению климата в отраслевое планирование.
3. **Реализация ОПА, включающая:**
 - определение приоритетов в процессе планирования адаптации отрасли к изменению климата;
 - координацию краткосрочной и долгосрочной адаптации отрасли;
 - укрепление потенциала в области планирования и реализации адаптации отрасли.
4. **Отчетность, мониторинг и обзор результатов адаптации** должны быть включены в отраслевую стратегию. Необходимо регулярно осуществлять:
 - мониторинг процессов ОПА;
 - обзор процессов ОПА для оценки их эффективности и возникающих пробелов и потребностей;
 - итеративное обновление ОПА;
 - представление отчетности о достигнутых результатах и эффективности ОПА.

¹⁴⁰ Раздел основан на работе: 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 // Environ. Res. Lett. 14. 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>

Главные методологические вопросы, связанные с оценкой влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России,¹⁴¹ нашли отражение в методологии, реализованной при подготовке Второго оценочного доклада Росгидромета¹⁴² на основе результатов глобального климатического моделирования для территории зернопроизводящих районов России.

Приведенные ниже оценки базируются на массовых ансамблевых расчетах, полученных в последние годы с использованием региональной климатической модели высокого разрешения (РКМ ГГО). Результаты этих расчетов служат входной информацией для имитационной системы «Климат-Почва-Урожай» (КПУ), с помощью которой проводятся расчеты возможных в будущем изменений продуктивности зерновых культур. КПУ включает: (1) динамическую модель продуктивности агроэкосистем Погода-Урожай¹⁴³; (2) стохастическую модель генерации рядов суточных метеорологических элементов, соответствующих определенной климатической норме¹⁴⁴; (3) данные, включающие гидрометеорологическую информацию за более чем 50-летний период, данные климатических сценариев, данные о физических и химических свойствах почвы; (4) апробированную методику оценки влияния изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства.¹⁴⁵

Динамические модели формирования урожая предпочтительны при оценке влияния изменений климата на сельское хозяйство.¹⁴⁶ Такие модели, откалиброванные для определенных районов, используют исторические данные об урожайности и данные метеорологических наблюдений¹⁴⁷ и они способны моделировать урожайность с учетом интенсивности использования удобрений, регуляторов высева, ирригации и других технологических приемов.

Входной информацией в КПУ служат температура и осадки, рассчитанные с помощью РКМ для четырех временных интервалов: 1990—1999, 2030—2039, 2050—2059, 2090—2099 гг. и сценария RCP8.5. Калибровка и валидация КПУ проводятся на основе ретроспективного моделирования, когда входной информацией для модели служат данные наблюдений. В качестве таких данных в настоящем исследовании были использованы метеорологические и агрометеорологические

¹⁴¹ Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2012: Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства / В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. С. М. Семенов (ред.). — М., Росгидромет, с.165—189.

¹⁴² Росгидромет, 2014.

¹⁴³ Сиротенко О. Д., 1981: Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем — Л.: Гидрометеоиздат, 167 с.; Sirotenko O. D., Abashina H. V., Pavlova V. N. (1997): Sensitivity of the Russian agriculture to changes in climate, CO₂ and tropospheric ozone concentrations and soil fertility // *Climatic Change*. v.36. p. 217—232.

¹⁴⁴ Павлова В. Н., 1986: Развертка информации о возможных изменениях климата для расчетов по динамическим моделям формирования урожаев // Труды ВНИИСХМ, вып. 21. с. 84—91.

¹⁴⁵ Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 2013: Методика оценки агроклиматических условий для мониторинга изменений современного климата на территории Российской Федерации. <http://method.meteorf.ru>

¹⁴⁶ Ortiz-Bobea A., Just R. E., 2012: Modeling the structure of adaptation in climate change impact assessment // *American Journal of Agricultural Economics*, v. 95 (2). p. 244—251.

¹⁴⁷ Sirotenko O. D., Abashina H. V., Pavlova V. N., 1997: Sensitivity of the Russian agriculture to changes in climate, CO₂ and tropospheric ozone concentrations and soil fertility // *Climatic Change*, v. 36, p. 217—232; 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*, p. 429—444; Schierhorn F., Faramarzi M., Prishchepov A. V., Koch F. J., Müller D., 2014: Quantifying yield gaps in wheat production on Russia // *Environ. Res. Lett.*, 9 084017 (12 p.).

наблюдения станций и постов Росгидромета и данные о динамике урожайности зерновых культур за период 2007—2016 гг.

Критерием пригодности модели КПУ для оценки будущих изменений биопродуктивности является степень согласованности рассчитанных по модели и фактических урожаев на отдельных территориях. В целом модель удовлетворительно воспроизводит динамику урожайности на рассматриваемых в настоящем исследовании территориях основных зернопроизводящих федеральных округов ЕЧР: Центрального ФО (ЦФО), Приволжского ФО (ПФО) и Южного ФО (ЮФО).¹⁴⁸

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ ПО РКМ

Оценки климатических изменений, полученные с помощью РКМ ГГО, приведены в табл. П2.1. На рассматриваемой территории России с развитым сельским хозяйством в ЦФО, ПФО и ЮФО, согласно расчетам, ожидается рост зимних температур воздуха более значительный, чем в теплый период года для всех трех временных периодов. Соответствующие изменения температуры календарной зимы составляют 1,7—2,2, 3,3—4,4 и 6,8—8,4°C в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. соответственно. Изменения температуры весной и летом положительны, но менее значительны: от 1,6 до 1,9°C, от 2,7 до 3,5°C и от 5,3 до 6,5°C соответственно в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. (табл. П2.1).

Таблица П2.1

Изменение средних сезонных температур (ΔT °C) и сумм осадков ($\Delta(\Sigma R)$ %) в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. по отношению к 1990—1999 гг.

Федеральный округ	ΔT , °C				$\Delta(\Sigma R)$, %			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
2030-2039 гг.								
Центральный*	2,1	1,7	1,9	1,7	9	14	-7	6
Приволжский	2,2	1,8	1,7	2,0	12	10	-5	10
Южный	1,7	1,6	1,9	1,7	10	15	-1	8
2050-2059 гг.								
Центральный*	3,8	3,0	2,9	3,0	18	22	-7	12
Приволжский	4,4	3,5	2,7	3,4	23	17	-5	18
Южный	3,3	2,8	3,0	2,9	19	25	1	15
2090-2099 гг.								
Центральный*	7,9	5,6	5,5	5,3	37	36	-18	16
Приволжский	8,4	6,5	5,5	6,2	47	31	-16	28
Южный	6,8	5,3	5,6	5,2	35	42	6	24

* Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Расчеты выполнены по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5.

¹⁴⁸ 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 // Environ. Res. Lett. 14. 034010.

В ближайшей перспективе весной ожидается увеличение осадков на 10—15 % по сравнению с базовым периодом на рассматриваемой территории, однако летом количество осадков снизится — на 7 % в ЦФО и на 5 % в ПФО. К середине и концу столетия эти тенденции сохранятся, например, к 2090—2099 гг. количество осадков весной увеличится на 31—42 %, а летом понизится на 16—18 % по сравнению с базовым периодом. В ЮФО количество летних осадков останется на уровне базового периода (–1 %) в 2030—2039 гг., а к 2090—2099 гг. можно ожидать незначительного увеличения — на 6 %. Осенние осадки увеличатся повсеместно, от 6—10 % в 2030—2039 гг. до 16—28 % в 2090—2099 гг. (табл. П2.1).

На рис. П2.1(а) и П2.2(а) представлено пространственное распределение отклонений средней температуры воздуха (°C) и сумм осадков (%) за календарные весну и лето для трех временных периодов 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. от соответствующих величин базового периода 1990—1999 гг. Осреднение оценок выполнялось по 50 реализациям РКМ ГГО. Оценки изменения температуры выполнены также для: влажной или гумидной (В, б) и сухой или аридной реализаций (С, в). Критерием для их выбора служил комплексный показатель — урожайность и показатели тепло- и влагообеспеченности культур.

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛО- И ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ

Большой размер ансамбля РКМ позволяет получить вероятностные оценки возможного изменения показателей гидротермического режима региона с высокой степенью статистической обеспеченности и с более полным описанием мезомасштабной изменчивости по сравнению с глобальными моделями. В то же время широкий диапазон модельных реализаций по изменению температуры воздуха и осадков дает возможность оценить множество возможных вариаций климата, включая экстремальные.

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что, несмотря на общее потепление, на территориях ЦФО, ПФО и ЮФО в будущем (вплоть до середины XXI в.) возможны сезоны, которые окажутся более холодными по сравнению с концом XX в. (рис. П2.3). В ПФО, в отличие от других регионов, наблюдается удовлетворительная согласованность между членами ансамбля в оценке уменьшения осадков: на 0,1—0,2 мм/сут. уже начиная с 2030-х гг. Можно предположить, что в XXI в. риски, связанные с ростом повторяемости засух, в ПФО, будут большими, чем в двух других округах.

В табл. П2.2 представлены ожидаемые изменения агроклиматических показателей на ЕЧР для средней по ансамблю и двух модельных реализаций — влажной «В» и сухой «С» — на 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. В качестве критерия выбора реализаций В и С принимались оценки показателей тепло- и влагообеспеченности и величина ожидаемой урожайности. Как видно, в XXI в. ожидается увеличение расходной части водного баланса — при росте температуры испарение в теплый период года возрастет на фоне прогноза слабого роста или уменьшения осадков. Рост испаряемости приведет к значительному увеличению дефицита испарения (разности между потенциальным и фактическим испарением). Диапазон ожидаемого дефицита испарения за теплый период года может возрасти от ~ 40—60 мм (2030—2039 гг.) до ~ 100—170 мм (2090—2099 гг.).

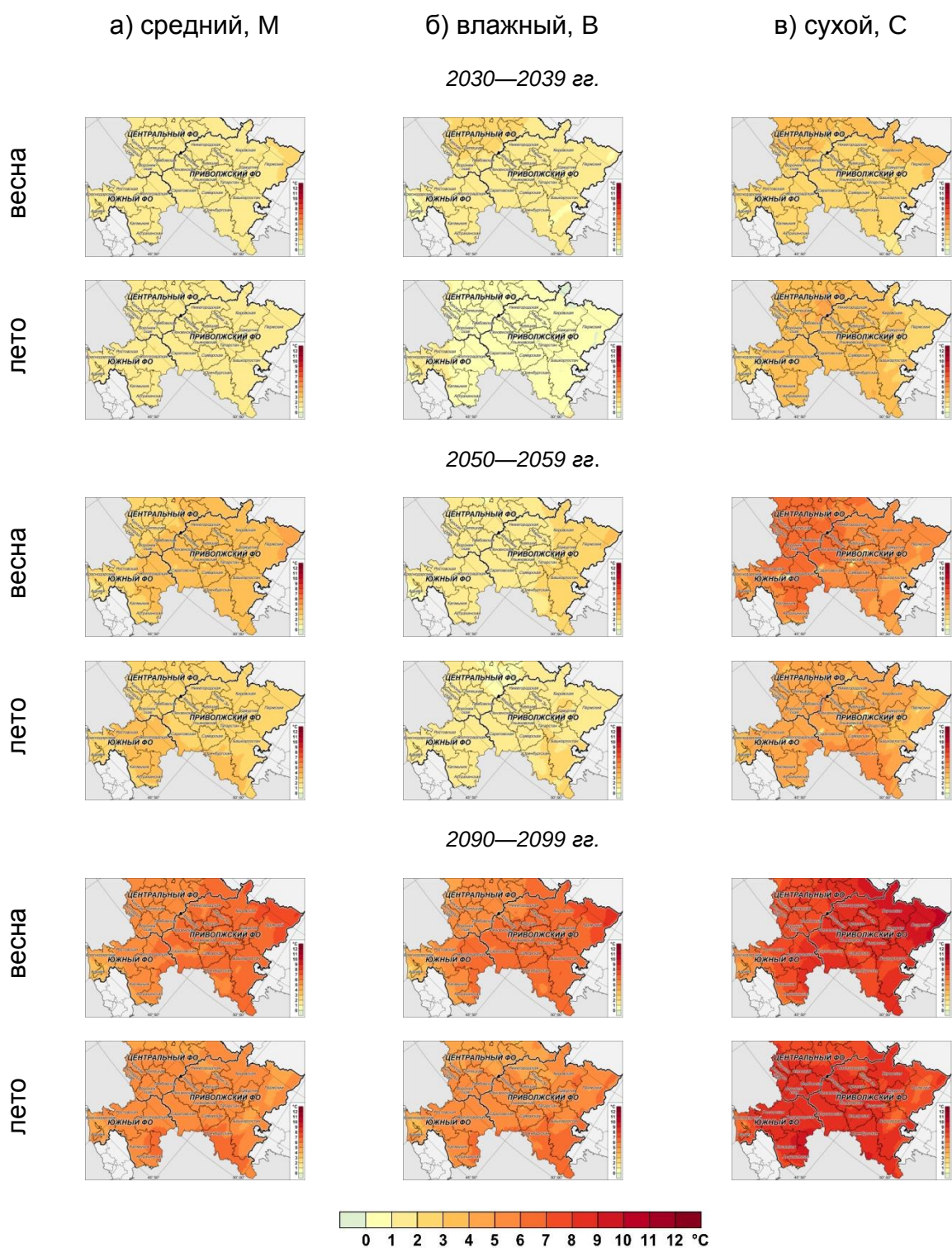


Рис. П2.1. Изменение средней температуры воздуха (°C) за весну и лето в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. по отношению к 1990—1999 гг. для реализаций: а — средней из 50, М; б — «влажной», В; в — «сухой», С. Картосхемы построены по данным РКМ ГГО в узлах регулярной сетки (0,5° с. ш. × 0,5° в. д.) для сценария RCP8.5.

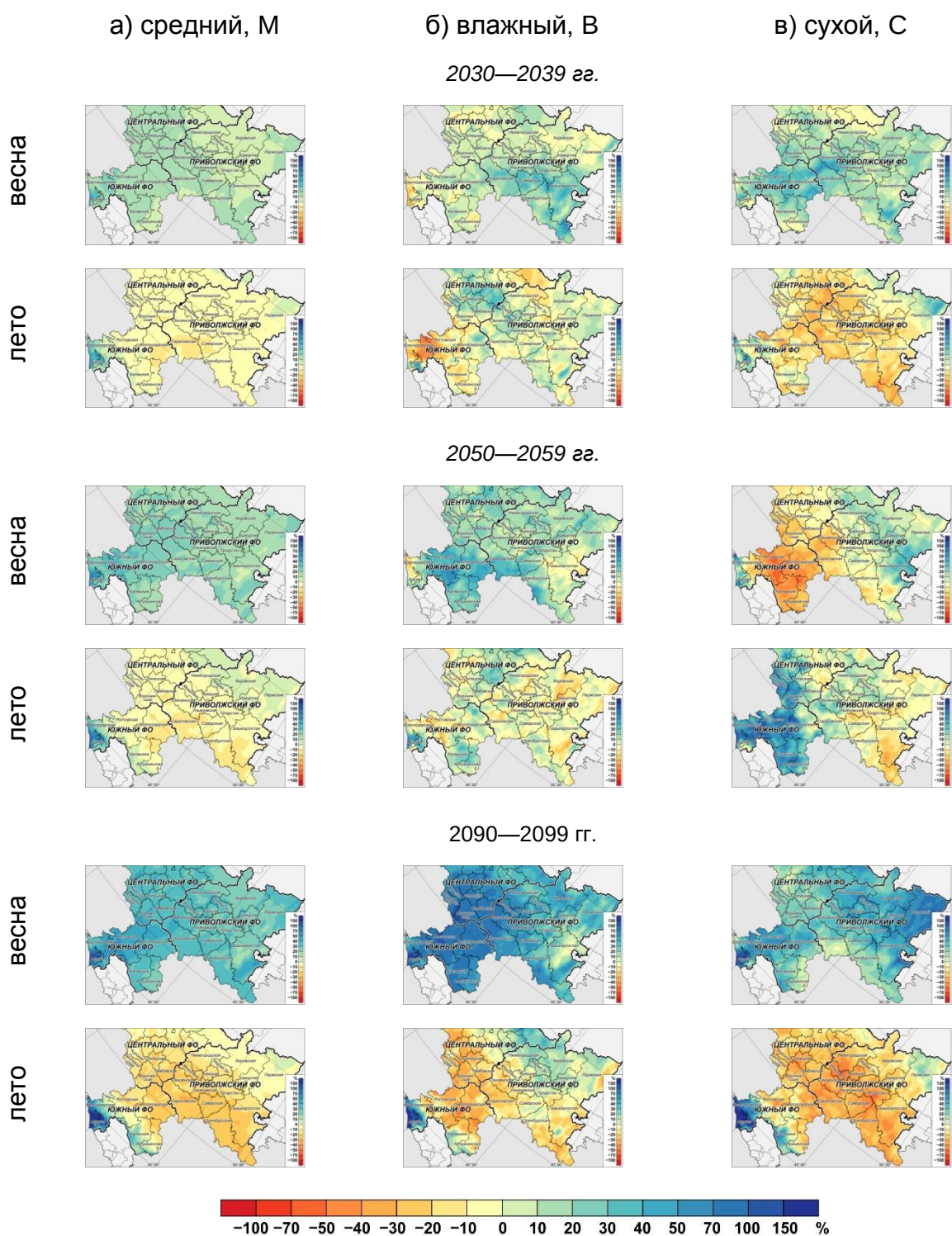
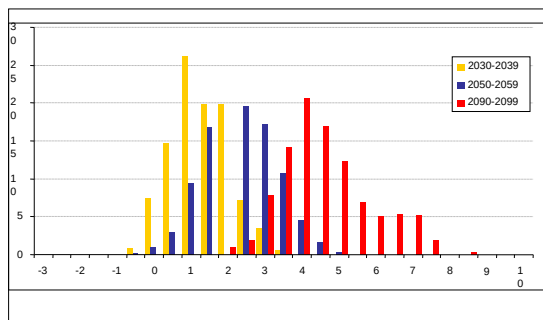


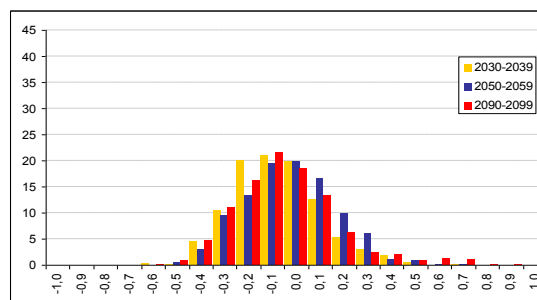
Рис. П2.2. Изменение сумм осадков (%) весной и летом в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. по отношению к 1990—1999 гг. для реализаций: а — средней из 50, М; б — «влажной», В; в — «сухой», С.

Картосхемы построены по данным РКМ ГГО в узлах регулярной сетки (0,5°с. ш. × 0,5°в. д.) для сценария RCP8.5.

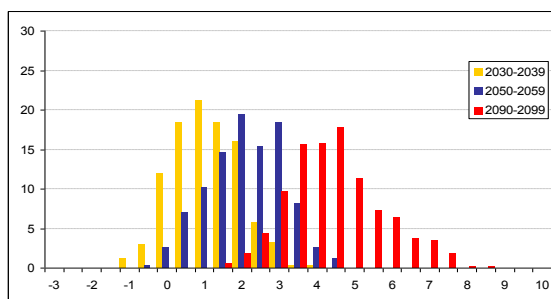
а)



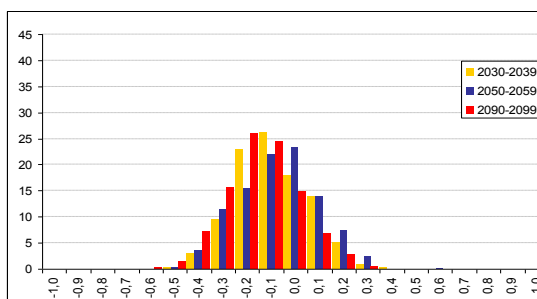
б)



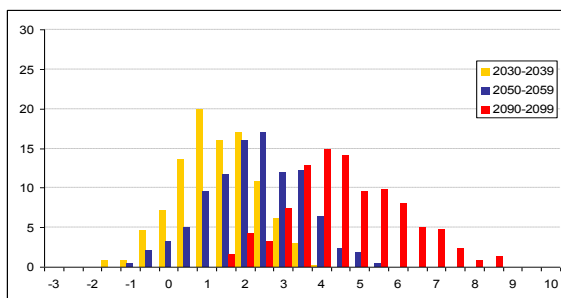
в)



г)



д)



е)

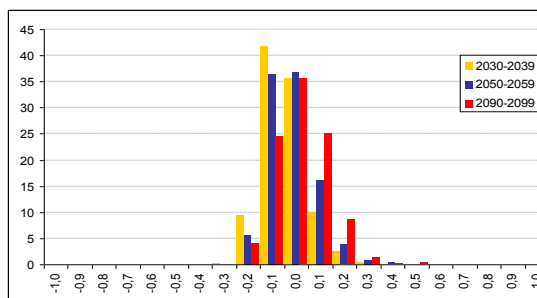


Рис. П2.3. Вероятностные функции распределения изменений температуры воздуха (°C) (а, в, д) и осадков (мм/сут.) (б, г, е) за период май—сентябрь для ЦФО (а, б), ПФО (в, г) и ЮФО (д, е) в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. по отношению к 1990—1999 гг.

Расчеты выполнены по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5.

По вертикальной оси — вероятность (%), по горизонтальной — изменения температуры (°C).

Таблица П2.2

Изменение термических и влажностных показателей периода вегетации яровой пшеницы в 2030—2039, 2050—2059 и 2090—2099 гг. по отношению к 1990—1999 гг. для средних (М), влажных (В) и сухих (С) реализаций

Расчеты выполнены в имитационной системе КПУ по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5.

ФО	Сценарий	T ₁ , °C	T ₇ , °C	ΣT ₁₀ , °C	Вегетационный период яровой пшеницы						ΔE, мм
					N ₀ , сут.	N, сут.	T, °C	ΣR, %	ГТК, ед.	W ₆ ¹⁰⁰ , мм	
2030-2039 гг.											
ЦФО*	M	2,2	2,0	401	-5	-5	1,0	-12	-0,14	-17	61
	B	1,2	0,2	262	-8	2	-0,2	17	0,19	-20	64
	C	1,5	4,0	948	-8	-12	2,3	-26	-0,27	-19	101
ПФО	M	2,1	1,8	351	-5	-7	1,2	-13	-0,14	-17	59
	B	0,3	0,5	143	-1	-1	0,2	9	0,09	-9	31
	C	2,3	4,0	740	-10	-13	2,4	-25	-0,25	-26	92
ЮФО	M	1,9	1,9	418	-6	-3	0,5	4	0,07	-8	41
	B	1,5	1,1	254	-9	3	-0,6	2	0,01	-8	32
	C	0,9	3,4	784	-7	-7	1,3	-3	-0,01	-7	57
2050-2059 гг.											
ЦФО*	M	3,8	3,0	681	-10	-7	1,2	-11	-0,12	-23	97
	B	0,5	1,5	353	-5	-2	0,4	-1	-0,02	-19	71
	C	2,4	5,0	1018	-20	-15	3,1	-37	-0,42	-14	140
ПФО	M	4,2	2,8	629	-11	-10	1,6	-15	-0,16	-29	101
	B	0,9	1,5	376	-9	-4	0,6	-12	-0,15	-22	71
	C	2,5	3,8	825	-20	-13	2,2	-20	-0,20	-40	130
ЮФО	M	3,3	2,9	720	-10	-4	0,8	5	0,08	-10	63
	B	1,5	1,2	435	-7	0	-0,2	17	0,15	-13	44
	C	0,9	4,7	1035	-18	-11	2,7	-52	-0,43	3	57
2090-2099 гг.											
ЦФО*	M	8,4	5,6	1339	-22	-9	1,6	-19	-0,19	-32	137
	B	8,8	4,5	1258	-27	-3	0,0	40	0,52	-41	125
	C	12,5	8,0	2063	-26	-16	3,7	-32	-0,36	-73	135
ПФО	M	8,4	5,6	1271	-22	-14	2,5	-25	-0,26	-45	167
	B	9,7	5,4	1261	-23	-14	2,2	-12	-0,12	-47	174
	C	11,6	8,1	1917	-29	-19	3,6	-31	-0,29	-46	189
ЮФО	M	7,3	5,4	1383	-27	-1	0,6	11	0,13	-24	102
	B	7,1	4,8	1348	-44	13	-2,1	65	0,54	-34	104
	C	10,0	7,5	1999	-35	-1	1,6	4	0,09	-51	106

* Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

T₁, T₇, T — средняя температура воздуха в январе, июле, за вегетационный период;
 ΣT₁₀ — сумма температур воздуха >10°C за теплый период (период с температурой воздуха выше 5°C);

N₀ — дата всходов; N — продолжительность вегетационного периода;
 ΣR — сумма осадков; W₆¹⁰⁰ — запасы влаги в слое почвы 0—100 см в июне;
 ΔЕ — дефицит испарения за теплый период.

В период 2030—2039 гг. изменение континентальности климата, которая определяется разностью температур июля и января, в среднем по регионам незначительное (0,2—0,3 °C), но к концу XXI в. может достигнуть величины 1,9—2,4 °C. Для характеристики увлажненности территории используется гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК)¹⁴⁹.

Согласно расчетам РКМ степень засушливости климата увеличится для всех трех временных интервалов практически на всей рассматриваемой территории. На территории ЦФО и ПФО возможно уменьшение величины ГТК относительно базового периода в диапазоне от -0,16 до -0,12 ед. в период 2050—2059 гг. и от -0,26 до -0,19 ед. к концу XXI в. Эти данные указывают на рост засушливости, который будет сопровождаться уменьшением запасов влаги в почве. Так, ожидаемые уменьшения запасов влаги в верхнем метровом слое почвы в ПФО составят для трех рассматриваемых периодов в XXI в., соответственно, 17, 29 и 45 мм. Ожидаемый рост засушливости, по-видимому, в меньшей степени затронет территорию ЮФО, о чем свидетельствует некоторый рост ГТК (на 0,07—0,13 ед.) и незначительное снижение июньских запасов влаги в почве в этом регионе (табл. П2.2).

Суммы активных температур повысятся в среднем на 351—418 °C в 2030—2039 гг. и на 629—720 °C в 2050—2059 гг., а к концу XXI века — еще почти в два раза. Дата всходов яровой пшеницы сдвинется на более ранние сроки: на 5—6 сут. в период 2030—2039 гг., на 10—11 сут. к середине века и на 22—27 сут. к его концу. Суммы осадков вегетационного периода яровой пшеницы к середине века понизятся на 11—15 % в ЦФО и ПФО и повысятся на 4—5 % в ЮФО относительно базового периода. К концу столетия на фоне снижения осадков в ЦФО и ПФО на 19—25 % за период вегетации яровой пшеницы средняя температура повысится на 1,6—2,5 °C (табл. П2.2).

Как отмечено выше, при ожидаемом росте аридности климата в будущем в среднем по ансамблю, имеются «экстремальные» прогнозные реализации с относительно благоприятными условиями увлажненности («В») и, наоборот, с исключительной засушливостью («С»). Расчет агроклиматических показателей для таких реализаций дает представление о степени неопределенности при прогнозировании воздействий климатических изменений на агросектор. Соответствующие оценки приведены в табл. П2.2. Так, к 2050—2059 гг. ожидаемый рост июльской температуры при реализации «С» составит 3,8—5,0 °C, а по реализации «В» — лишь 1,2—1,5 °C. В случае реализации «С» ГТК может понизиться на 0,20—0,43 ед., а сумма осадков за период вегетации яровой пшеницы сократиться на 20 % (ПФО), 37 % (ЦФО) и 52 % (ЮФО). На рис. П2.4(а) показаны значения сумм температур выше 10 °C, суммы осадков за период вегетации яровой пшеницы и ГТК, осредненные за базовый период. Соответствующие значения для ансамблевых реализаций «В» и «С» на 2050—2059 гг. представлены на рис. П2.4(б, в). Расхождение оценок, соответствующих расчетам «В» и «С», указывает на значительный вклад естественной изменчивости климата в ошибку предсказания ансамблем будущих изменений агроклиматических показателей для рассматриваемой территории.

¹⁴⁹ Селянинов Г. Т., 1958: Принципы агроклиматического районирования территории СССР / В кн.: Вопросы агроклиматического районирования СССР. — М.: Изд. Минсельхоза СССР. С. 7

а) 1990-1999 гг.

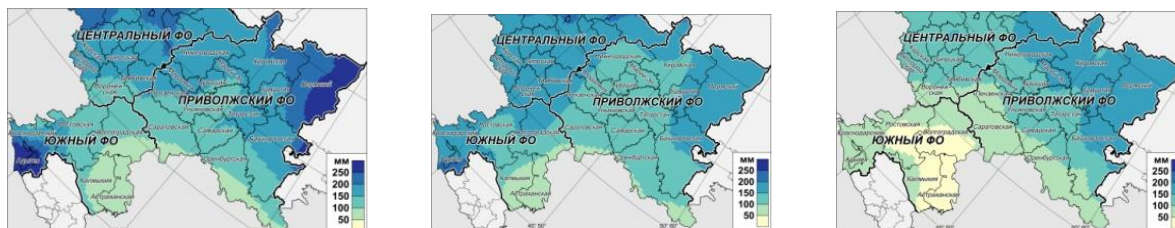
б) 2050-2059 гг., «В»

в) 2050-2059 гг., «С»

Сумма температур выше 10 °С за теплый период года, °С



Сумма осадков за период вегетации яровой пшеницы, мм



ГТК за период вегетации яровой пшеницы, ед.



Рис. П2.4. Распределение средних значений сумм температур выше 10 °С, суммы осадков и гидротермического коэффициента за вегетационный период в 1990—1999 гг. (а) и в 2050—2059 гг. (б, в) для реализаций: б) — «влажной», В; в) — «сухой», С.

Расчеты выполнены по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5.

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ПРИМЕРЕ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ (РАСЧЕТЫ В ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ КПУ И РКМ)

Расчеты климатических воздействий на продуктивность яровой пшеницы в основных ареалах ее возделывания для разных временных горизонтов в XXI в. (табл. П2.3 и рис. П2.4) были выполнены с учетом изменения уровня концентрации CO₂ в атмосфере, согласно имеющимся оценкам¹⁵⁰.

В близкой перспективе (2030—2039 гг.) можно ожидать снижения урожайности на территории ЦФО (черноземная зона) на $-11,7 \pm 3,0 \%$, величина которого к середине века может достигнуть $-15,8 \pm 5,1 \%$ относительно базового периода. К концу столетия урожайность зерновых может сократиться на треть при прогнозируемых изменениях климата и при отсутствии адаптационных мер,

¹⁵⁰ Clarke L., Edmonds J., Jacoby H., Pitcher H., Reilly J., Richels R., 2007: Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC, 154 pp.; Clarke L., Edmonds J., Krey V., Richels R., Rose S., Tavoni M., 2009: International climate policy architectures: overview of the EMF 22 international scenarios // *Energ Econ* 31(suppl 2):S64-S81.

направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности посевов сельскохозяйственных культур теплом и влагой (табл. П2.3).

Таблица П2.3

Изменение урожайности яровой пшеницы (ΔY , %) на территории ЦФО, ПФО и ЮФО в разные периоды XXI в. и соответствующий 95%- доверительный интервал

Федеральный округ	ΔY		
	2030-2039 гг.	2050-2059 гг.	2090-2099 гг.
ЦФО*	$-11,7 \pm 3,0$	$-15,8 \pm 5,1$	$-32,9 \pm 3,4$
ПФО	$-5,7 \pm 2,4$	$-6,7 \pm 3,0$	$-21,5 \pm 3,1$
ЮФО	$-9,9 \pm 2,3$	$-8,2 \pm 3,0$	$-2,6 \pm 3,4$
ЦФО+ПФО+ЮФО	$-9,1 \pm 2,3$	$-10,3 \pm 3,2$	$-18,9 \pm 2,8$

* Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Расчеты выполнены в имитационной системе КПУ по данным РКМ ГГО (50 реализаций), сценарий RCP8.5.

Полученные средние по ансамблю оценки изменения урожайности яровой пшеницы и соответствующий 95% доверительный интервал для ПФО показывают, что до середины текущего столетия здесь не следует ожидать роста климатически обусловленной урожайности. Снижение продуктивности яровой пшеницы составит $-6,7 \pm 3,0$ % к 2050—2059 гг. Это меньшее падение продуктивности сельского хозяйства по сравнению с ее ожидаемым падением в центрально-черноземных областях ($-15,8 \pm 5,1$ %). Умеренный рост засушливости климата в ближайшие 2—3 десятилетия на этой территории не окажет существенного влияния на сельское хозяйство.

Расчеты показали, что падение урожайности яровой пшеницы в ЮФО может достигнуть величины $-9,9 \pm 2,3$ % уже в 2030—2039 гг. Однако к концу столетия ожидаемое изменение агрометеорологических условий вегетационного периода яровой пшеницы при значительном сдвиге даты всходов на более ранние сроки, сопровождаемое ростом температуры лишь на $0,6$ °C, и ростом осадков на 11 % относительно базового периода (табл. П2.2), приведет к тому, что в ЮФО можно ожидать незначительного снижения урожайности — на $2,6 \pm 3,4$ %.

Итак, полученные оценки будущих изменений факторов урожайности в основных зернопроизводящих районах ЕЧР указывают на усиление в XXI в. 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 к уменьшению либо слабому изменению осадков. К середине XXI в. потепление на ЕЧР может привести к снижению продуктивности зерновых культур на $10,3 \pm 3,2$ % по сравнению с базовым периодом. В тот же период наибольшие потери продуктивности могут составить $-15,8 \pm 5,1$ % в центрально-черноземных областях, наименьшие ($-6,7 \pm 3,0$ %) — в ПФО. К концу XXI в. урожайность зерновых здесь может

сократиться на треть в отсутствии адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности растений влагой и снижением ее запасов в почве.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ

На территории России прогнозируемое потепление приведет к существенному расширению вегетационного (теплого) периода года. Суммы температур выше 10°C возрастут примерно на 600—700°C к 2050—2059 гг. и почти на 1300—1400°C к концу XXI в. Это позволит использовать в земледелии позднеспелые сорта, которые обычно более урожайные. Предварительные оценки с помощью КПУ показывают, что использование среднеспелых и позднеспелых сортов позволит увеличить урожайность зерновых культур на ~ 15% в конце XXI в.

Эффективное использование дополнительных тепловых ресурсов в результате потепления климата может быть достигнуто при расширении посевов особо ценных теплолюбивых сельскохозяйственных культур (кукуруза, соя, подсолнечник и др.), а также в результате выращивания вторых (поздних) культур для утилизации тепловых ресурсов, остающихся после уборки основной культуры. Это также приведет к росту продуктивности и зерновых и кормовых культур даже при сохранении современного агротехнического уровня земледелия.

Для оценки эффективности использования дополнительных тепловых ресурсов при потеплении климата нами использована шкала классификации климата по обеспеченности культурных растений теплом. Особо ценные и дефицитные для России теплолюбивые сельскохозяйственные культуры (кукуруза, соя, подсолнечник, сахарная свекла и др.) возделываются на территориях, относящихся к температурным поясам умеренного, умеренно-теплого и теплого поясов. Для созревания сортов кукурузы на зерно, подсолнечника на семена, сои, риса, бахчевых необходима сумма температур вегетационного периода в диапазоне от 2200—2800°C. Потребности в тепле и влаге для роста и развития кукурузы на зерно составляют: средняя температура в июне и июле должна быть не ниже 18°C, а суммарное количество осадков с июня по август превышать 200 мм.

В перечень показателей (индексов) включены: сумма температур за вегетационный период (ΣT_{10}), средняя температура за июль-август (T_{78}), сумма осадков за июль-август (ΣR_{678}). По данным наблюдений рассчитаны агроклиматические показатели условий возделывания кукурузы на зерно на территории ЦФО, ПФО и ЮФО для базового периода 1961—1990 гг. и по данным сценария RCP8.5 на 2050—2059 гг. Полученные результаты по отдельным субъектам (краям, областям, республикам) представлены в табл. П2.4.

Расчеты показателей термического и влажностного режима (табл. П2.4) по сценарию RCP8.5 свидетельствуют, что к середине столетия на всей территории региона ресурсы тепла не будут ограничивать производство кукурузы. Ограничение ее производства может быть связано с запасами влаги в почве, которые к 2050 г. понизятся как на юге ПФО, так и в центрально-черноземных областях. Среднеспелые и позднеспелые сорта станут возможным выращивать в Кировской и Нижегородской областях, Республиках Марий Эл и Чувашии.

Таблица П2.4

Агроклиматические показатели условий возделывания кукурузы на зерно на территории ЦФО, ПФО и ЮФО в 1961—1990 гг. (базовый период) и 2050—2059 гг. (сценарий RCP8.5.)

Область, край, республика	ΣT_{10}	T_{78}	$\Delta \Sigma T_{10}$	ΣR_{678}	ΣT_{10}	ΔT_{78}	ΔR_{678}
	1961—1990				2050-2059		
Кировская, с	1873	15,9	351	222	2224	2,9	6,3
Кировская, ю	2211	17,2	276	202	2487	2,7	11,0
Нижегородская, с	2202	17,0	305	211	2507	2,5	15,5
Нижегородская, ю	2505	18,0	280	197	2785	2,8	8,6
Мари Эл	2309	17,4	290	193	2599	2,8	10,8
Чувашия	2540	18,2	266	194	2806	2,9	3,6
Мордовия	2653	18,3	216	188	2869	2,9	3,9
Липецкая	2838	19,2	236	190	3074	3,0	-3,3
Тамбовская	2881	19,3	223	179	3104	3,1	-4,7
Курская	2788	18,7	249	213	3037	3,0	8,1
Белгородская	3037	19,6	250	195	3287	3,0	-8,4
Воронежская	3112	20,1	255	184	3367	3,1	-3,5
Татария	2574	18,2	204	172	2778	3,0	4,1
Пензенская	2674	18,5	236	178	2910	3,0	-3,8
Ульяновская	2730	18,8	228	170	2958	2,9	-2,7
Самарская	2994	19,8	143	149	3137	3,2	-4,2
Саратовская, в	3277	21,4	187	113	3464	3,1	0,0
Саратовская з	3045	20,3	243	147	3288	3,1	0,7
Волгоградская, в	3632	22,9	215	106	3847	3,2	-3,0
Волгоградская, з	3472	21,9	246	139	3718	3,2	1,9
Калмыкия	3938	24,3	303	91	4241	3,1	13,4
Астраханская	3965	24,1	265	67	4230	3,3	0,2
Ростовская, с	3457	21,6	257	148	3714	3,2	-0,2
Ростовская, ю	3742	22,8	252	144	3994	3,2	11,2
Краснодарский	3790	22,6	326	182	4116	2,6	43,1
Ставропольский, в	3825	23,9	311	143	4136	2,3	57,9
Ставропольский, з	3256	20,3	210	223	3466	2,6	103,1
Удмуртия	2244	17,2	294	191	2538	2,8	6,9
Пермский, с	1638	15,2	383	213	2021	2,5	16,4
Пермский, ю	2046	15,5	300	214	2346	2,6	6,8

Обозначение: с — север, ю — юг, з — запад, в — восток.

АДАПТАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА К ОЖИДАЕМЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

Для получения реалистичных оценок влияния ожидаемых изменений климата необходимо учитывать возможность приспособления (адаптации) сельского хозяйства к изменяющимся условиям среды, хотя эта природно-экономическая система отличается высокой консервативностью.

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 — быстрые как наблюдаемые, так и прогнозируемые изменения климата на ее территории; вторая — сильная зависимость сельского хозяйства от изменений и колебаний климата и третья — наличие большого потенциала адаптации.

Ниже приведены результаты, иллюстрирующие принципиальные возможности имитационной системы КПУ при решении задач адаптации производства сельскохозяйственных культур к изменениям климата. Как указывалось выше, в системе КПУ предполагается использование многомерной системы оценок биоклиматического потенциала для ряда фиксированных уровней интенсификации земледелия: низкозатратного — Y_0 , интенсивного при орошаемом земледелии — Y_W , интенсивного на базе химизации — Y_N и высокоинтенсивного на базе химизации и орошения — Y_{WN} .

С помощью системы КПУ получены оценки приращения климатически обусловленной урожайности при разных мерах адаптации, включающие достаточный уровень увлажненности (ΔY_W) и достаточный уровень минерального питания (ΔY_N). Расчеты, выполненные для яровой пшеницы по ансамблю РКМ ГГО для трех вариантов прогнозируемых условий: среднего из 50 реализаций, влажного и сухого на 2050—2059 гг., представлены в табл. П2.5.

Таблица П2.5

Приращение урожайности (%) яровой пшеницы к 2050—2059 гг. при достаточном уровне увлажненности (ΔY_W) и достаточном уровне минерального питания (ΔY_N). для трех вариантов прогнозируемых условий – среднего из 50 реализаций, влажного и сухого.

Федеральный округ	ΔY_W	ΔY_N	ΔY_W	ΔY_N	ΔY_W	ΔY_N
	Средний		Влажный		Сухой	
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.

Расчеты в имитационной системе КПУ.

При достаточном увлажнении почвы приращение урожайности яровой пшеницы к 2050—2059 гг. в засушливых регионах составит: в ЮФО 8—16 ц/га и на юге ПФО 7—11 ц/га. В нечерноземной зоне на менее плодородных почвах (север ПФО) урожайность может увеличиться на 11-18 ц/га за счет достаточного минерального питания (табл. П2.5).

Расчеты показали, что 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 середине и концу текущего столетия незначительно отличается от периода 2030—2039 гг.

В зоне недостаточного увлажнения адаптационные экономические меры должны быть направлены не только на использование дополнительных тепловых ресурсов,

но и на экономное расходование водных ресурсов путем:

- более широкого внедрения влагосберегающих технологий (снегозадержание, уменьшение непродуктивного испарения, ультраранние сроки сева и др.);
- расширения посевов более засухоустойчивых культур – прежде всего кукурузы, а также подсолнечника, проса и др.;
- расширения посевов озимых культур – пшеницы в степных районах Поволжья, Урала и Западной Сибири, ячменя на Северном Кавказе, в Ростовской и Волгоградской областях;
- расширения орошаемого земледелия, которое следует рассматривать не только как самую кардинальную меру борьбы с ростом засушливости климата, но и как условие наиболее полного использования дополнительных тепловых ресурсов.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ (НА ПРИМЕРЕ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА)¹⁵¹

Региональный план адаптации

Региональный план адаптации (РПА) предназначен для снижения уязвимости к последствиям климатических изменений путем повышения адаптационного потенциала соответствующего субъекта Российской Федерации (и его регионов).

Процесс разработки и реализации РПА включает следующие этапы:

1. **Проведение подготовительных работ и выявление факторов, препятствующих процессу адаптации региона.** Этот этап направлен на создание стратегии региона, включая определение зон ответственности и участие представителей секторов экономики и социального сектора на уровне региона, региональных и местных властей в адаптационном процессе, а также установление примерных сроков и ожидаемых результатов принятых мер. Для координации разработки и реализации РПА целесообразно создание межведомственной рабочей группы на уровне субъекта Российской Федерации, с обязательным участием представителей Росгидромета. Мероприятия, проводимые на этом этапе аналогичны мероприятиям соответствующего этапа создания НПА.
2. **Подготовка основных компонентов РПА.** На этом этапе особое внимание уделяется определению потребностей, возможностей и приоритетов адаптационных мер и координации их в целях устойчивого развития региона, включая:
 - анализ текущего состояния климатической системы и сценариев будущих изменений климата в регионе;
 - оценку подверженности и уязвимости, а также определение возможных вариантов адаптации региона (на основе их обзора и оценки) в разрезе секторов экономики и социальной сферы;
 - составление и представление РПА;
 - интеграцию плана адаптации к изменению климата в планирование развития региона.
3. **Реализация РПА, в том числе:**
 - определение приоритетов в процессе планирования адаптации региона к изменению климата;
 - координация краткосрочной и долгосрочной адаптации региона;
 - укрепление потенциала в области планирования и реализации адаптации региона.

¹⁵¹ Раздел основан на работе: 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. См. также Катцов В. М., Порфирьев Б. Н., Говоркова В. А., Елисеев Д. О., Ефимов С. В., Киселев А. А., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Ревич Б. А., Спорышев П. В., Терентьев Н. Е., Хлебникова Е. И., Школьник И. М., 2017: Изменения климата Арктики: место климатической науки в планировании адаптации, (п/ред. В.М. Катцова) — СПб: Климатический центр Росгидромета, 104 с.

4. **Отчетность, мониторинг и обзор результатов адаптации** должны быть включены в стратегию развития региона. Необходимо регулярно выполнять осуществлять:
- мониторинг процессов РПА;
 - обзор процессов РПА для оценки их эффективности и возникающих пробелов и потребностей;
 - итеративное обновление РПА;
 - представление отчетности о достигнутых результатах и эффективности РПА.

МЕТОДОЛОГИЯ И ДАННЫЕ

В работе над адаптационными программами необходимо учитывать не только наблюдаемые изменения, но и сценарные прогнозы изменений климата, полученные с помощью климатических моделей. Существовавшие до недавнего времени оценки будущих изменений климата и их воздействий на хозяйственную деятельность на территории России базировались, в основном, на расчетах с глобальными моделями сравнительно грубого пространственного разрешения.¹⁵² Значительный прогресс в области разработки региональных климатических моделей высокого пространственно-временного разрешения, достигнутый в последние годы, позволяет существенно повысить информативность сценарных прогнозов изменения климата в регионах России и дает возможность использовать эти прогнозы для разработки адаптационных программ с учетом региональной и отраслевой специфики.

Здесь обсуждаются результаты анализа изменения климатических воздействий на развитие наиболее важных отраслей экономики и социальной сферы в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), которые целесообразно учитывать при адаптации к изменениям климата на региональном уровне. Рассматриваются детализированные оценки климатических изменений наиболее важных показателей приземной температуры воздуха и режима увлажнения на территории российской Арктики в XXI веке. В основу анализа положены результаты численных экспериментов с использованием региональной климатической модели (РКМ) ГГО¹⁵³, которые были проведены для Арктического региона в рамках международного проекта CORDEX¹⁵⁴, организованного под эгидой Всемирной Программы Исследования Климата с целью скоординированной оценки будущих климатических изменений в различных регионах мира. Оценки ожидаемых изменений получены на основе расчета климата за исторический (1951—2005 гг.) и прогностический (2006—2100 гг.) периоды для сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5¹⁵⁵.

Разрешение в несколько десятков километров позволяет учитывать влияние на атмосферу мезомасштабных факторов — реалистичной орографии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности

¹⁵² Росгидромет, 2014.

¹⁵³ . Shkolnik I. M., Efimov S. V., 2013: Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: Added value and uncertainties // *Environ. Res. Lett.*; doi: 10.1088/1748-9326/8/4/045007

¹⁵⁴ Giorgi F., Gutowsk W. J., 2015: Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative // *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 40, pp. 467—490; doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217.

¹⁵⁵ van Vuuren D. P., Edmonds J. A., Kainuma M. et al. 2011: The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*, vol. 109, pp. 5—31; doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

и свойств подстилающей поверхности, а также сложных взаимодействий вблизи границы раздела сред суша-вода. Учет таких особенностей обуславливает успешное использование региональных моделей в задачах комплексной оценки климатических воздействий на социально-экономическое развитие регионов.

Изменения климатических факторов обсуждаются в контексте анализа современного состояния и перспективы развития ключевых региональных сегментов экономики. Влияние изменений климата на морскую деятельность рассматривается во Втором оценочном докладе Росгидромета¹⁵⁶. Здесь же основное внимание уделяется анализу климатических воздействий, затрагивающих материковую часть российской Арктики.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭКОНОМИКИ АЗРФ В XXI ВЕКЕ

С точки зрения развития национальной экономики — с учетом геополитических реалий — территории, относящиеся к Арктической зоне РФ, представляют стратегический интерес. Экономический потенциал российской Арктики — и Западной, и Восточной ее частей — оценивается специалистами достаточно высоко.¹⁵⁷ Это связано не только с большими прогнозными запасами углеводородов в регионе, но и с ожидаемыми климатическими изменениями, которые предположительно приведут к возрастанию значимости Северного морского пути как трансконтинентального транспортного коридора и усилению роли крупных судоходных рек бассейна Северного Ледовитого океана. К настоящему времени сформирован обширный перечень инвестиционных проектов, запланированных к реализации на территории Арктической зоны РФ, часть из которых обладает потенциальным мультипликативным эффектом и относится к числу приоритетных. Большинство проектов направлено на решение задач добывающей и транспортной отраслей. Эти проекты сильно 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 в., является своевременным и необходимым.

Добывающая промышленность. Нефтегазовый комплекс и горнодобывающая отрасль занимают основное место в структуре экономики Арктической зоны. 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

¹⁵⁶ Данилов А. И., Алексеев Г. В., Клепиков А. В. и др., 2014: Морская деятельность в Арктике / В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации — М., Росгидромет, с. 898—919; <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52>

¹⁵⁷ 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.

и на шельфе.¹⁵⁸ Прямое воздействие происходящих изменений термического режима в холодный сезон на протяжении XXI в. является благоприятным для нефтегазового сектора.

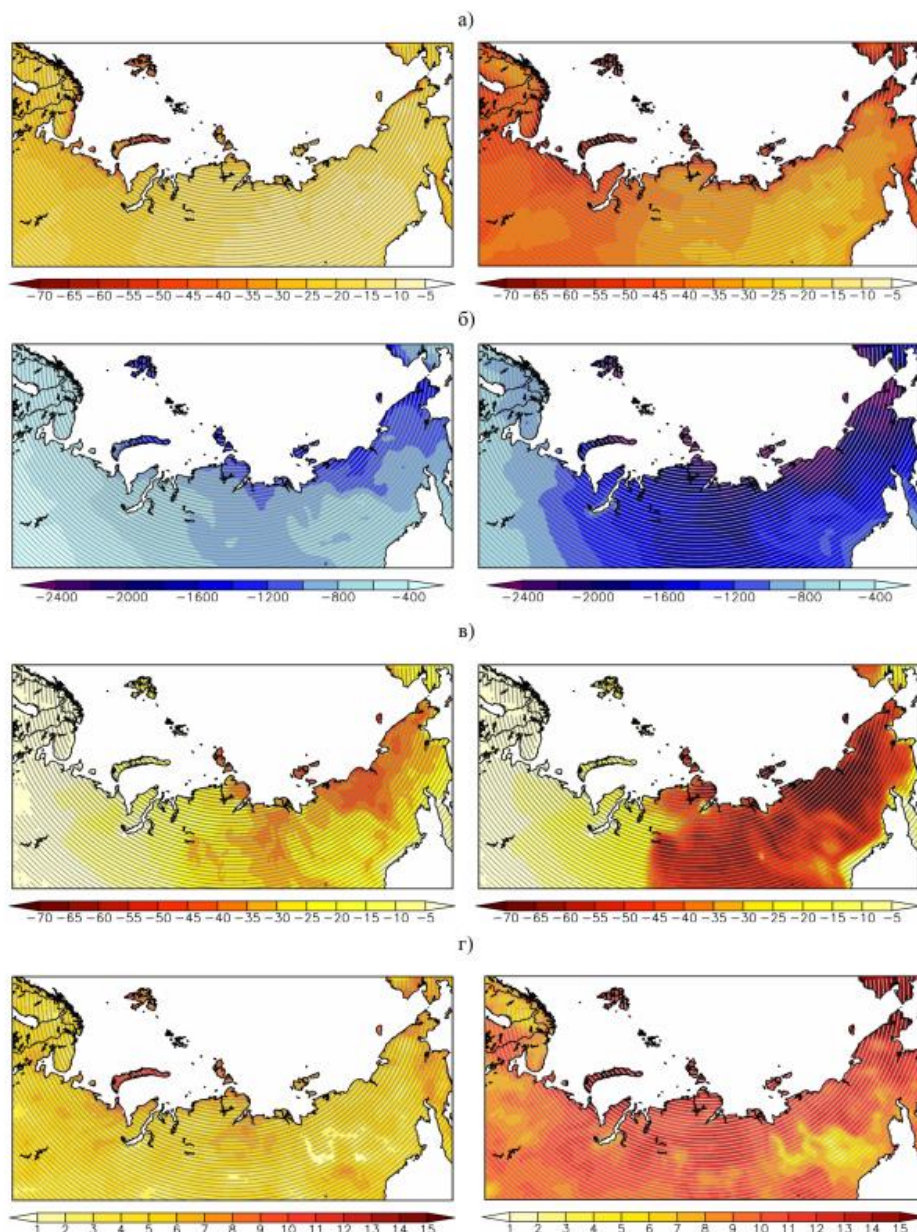


Рис. ПЗ.1. Изменение средних многолетних значений температурных показателей суровости климата к середине XXI в. (слева) и концу XXI в. (справа) по отношению к базовым значениям за 1981—2000гг. (РКМ ГГО; сценарий RCP8.5):

а — продолжительность (дни) периода с отрицательной температурой воздуха;

б — градусо-дни с отрицательной температурой воздуха ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сутки}$);

в — число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже -30°C ;

г — годовой минимум средней суточной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

Здесь и далее мелкими точками выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%.

¹⁵⁸ Хлебникова Е. И., Салль И. А., 2012: Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в XXI в. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 567, с. 45—84.

Потепление, сопровождаемое сокращением продолжительности зимнего сезона и уменьшением градусо-дней с отрицательной температурой воздуха (рис. ПЗ.1а, б), создает более благоприятные возможности для производства буровых работ и прокладки трубопроводных сетей. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже -30°C (рис. ПЗ.1в) приведет к уменьшению простоев в работе, положительно отразится на работоспособности оборудования и величине эксплуатационных расходов. Вместе с тем, происходящее потепление вызывает усиление тенденций в изменении климата, являющихся — с точки зрения функционирования нефтегазового сектора в регионе — неблагоприятными. 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 является наибольшим (рис. ПЗ.2а).

На территории ЯНАО ожидаемое к концу XXI в. увеличение составляет около 40 %, а на севере Якутии и Чукотского АО достигает 70%. Рост осадков в Арктике отмечается во все календарные сезоны, но наиболее сильно проявляется в холодный период года в Азиатской части (рис. ПЗ.2в). В период с апреля по октябрь (рис. ПЗ.2г) на большей части АЗРФ относительное увеличение количества осадков не столь значительно; максимальные значения (около 50%) достигаются на территории Ямало-Ненецкого автономного округа.

На всей территории АЗРФ отмечается выраженный рост суточной интенсивности осадков при отрицательной температуре воздуха (рис. ПЗ.2д). На Азиатской территории АЗРФ — в отличие от Европейского Севера — ожидается также рост суммы осадков, выпадающих при отрицательной температуре воздуха, и, соответственно, увеличение снегонакопления (рис. ПЗ.2б).

Увеличение интенсивности зимних осадков (рис. ПЗ.2д, ж) 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 Арктике связаны с деградацией вечной мерзлоты.¹⁵⁹ На фоне глобального потепления значительную роль в деградации играют техногенные составляющие регионального и локального масштабов. Оценки, основанные на использовании региональной климатической модели с добавлением мезомасштабных блоков атмосферного пограничного слоя и теплопереноса в грунтах¹⁶⁰, позволят детализировать пространственные распределения скорости деградации вечной мерзлоты, полученные по ансамблю глобальных моделей CMIP5¹⁶¹.

¹⁵⁹ Росгидромет, 2014

¹⁶⁰ Надежина Е. Д., Орленко Л. Р., Пикалева А. А., 2013: Оценки эволюции теплового состояния многолетнемерзлых грунтов на побережье Арктических морей с использованием системы моделей разного пространственного масштаба // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 569, с. 62—74; Пикалева А. А., Надежина Е. Д., Стернзат А. В. и др., 2016: Исследование эволюции вечной мерзлоты на территории России с помощью моделей пограничного слоя атмосферы и теплопередачи в грунтах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 581, с. 24—40.

¹⁶¹ Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А. и др., 2013: Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, вып. 569, с. 39—62.

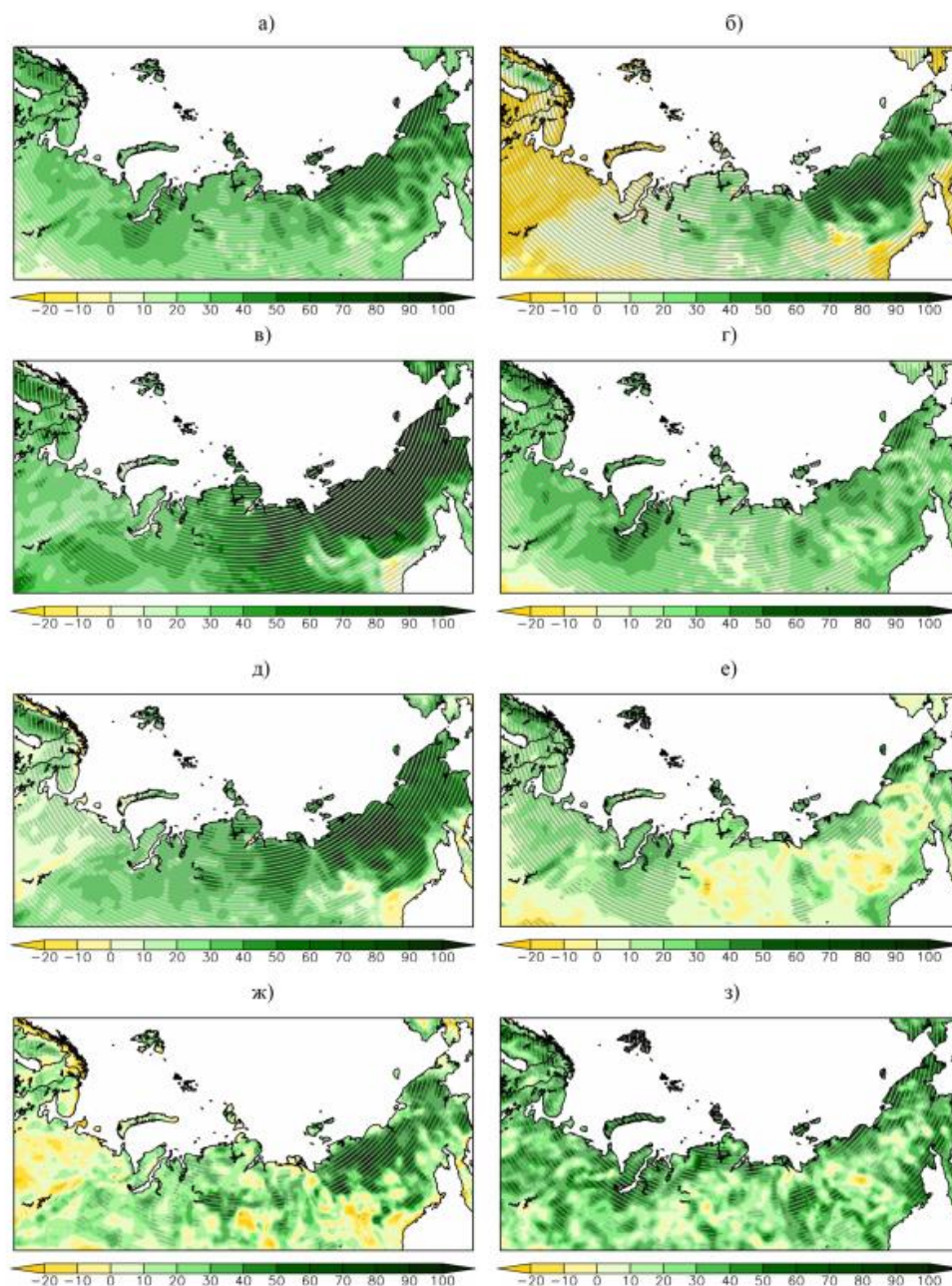


Рис. ПЗ.2. Изменение (%) средних многолетних значений показателей увлажнения к концу XXI в. по отношению к базовым значениям за 1981—2000гг. (РКМ ГГО; сценарий RCP8.5):

- 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.

Система энергоснабжения. АЗРФ характеризуется широким разнообразием используемых схем и источников энергии и отражает 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.

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 приведут к существенному сокращению продолжительности отопительного периода, наиболее заметному в Западной Арктике (рис. ПЗ.3а). На северо-востоке Европейского Севера уменьшение составит 40—50 дней к середине XXI в., до 60—70 дней — к концу 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 — приведет к значительному уменьшению дефицита тепла за отопительный период, величина которого может рассматриваться как индекс потребления энергии.¹⁶² Это уменьшение будет наиболее выраженным на Азиатском Севере — в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями (рис. ПЗ.3б). К концу XXI в. 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 в.). 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 р. 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).

¹⁶² Хлебникова Е.И., Салль И.А., 2013: Климатические факторы энергопотребления в России: тенденции, вариабельность, неопределенность оценок. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, вып. 569, с. 45-84.

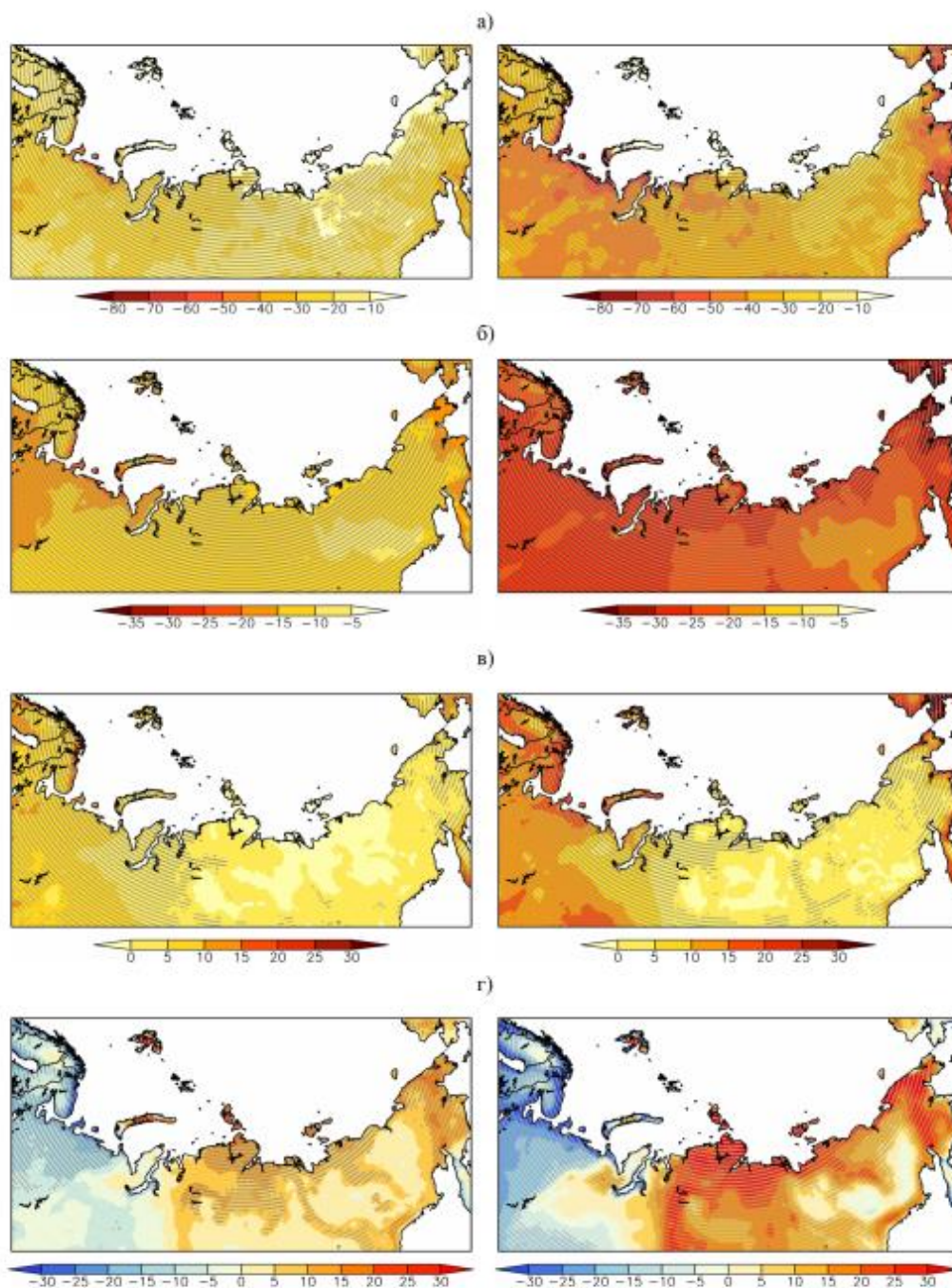


Рис. ПЗ.3. Изменение средних многолетних значений специализированных температурных показателей холодного периода года к середине XXI в. (слева) и концу XXI в. (справа) по отношению к базовым значениям за 1981—2000 гг. (РКМ ГГО; сценарий RCP8.5):

- а — продолжительность (дни) отопительного периода;
- б — индекс потребления энергии (%) за отопительный период;
- в — число дней с переходом температуры воздуха через 0°C (ноябрь-март);
- г — число дней, благоприятных для рекреации ($-15^{\circ}\text{C} < T_{\text{сут.}} < -5^{\circ}\text{C}$).

Климатические характеристики температуры воздуха лежат в основе принимаемых решений по выбору типов применяемых конструкций и материалов, технологии работ и организации строительства¹⁶³. Происходящие изменения термического режима являются благоприятными с точки зрения производства работ. Растет число дней с температурой воздуха меньше -30°C , приемлемых для работ на открытом воздухе (рис. ПЗ.1в). Уменьшается период с отрицательными значениями температуры воздуха (рис. ПЗ.1а), 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. ПЗ.1г). Это увеличение сравнительно невелико в Западной Арктике и весьма значительно в восточных регионах (до $10\text{—}15^{\circ}\text{C}$ к концу века).

Региональный анализ изменения годовых максимумов средней суточной температуры воздуха (рис. ПЗ.4в) 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 преждевременным. 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.¹⁶⁴ Полученные свидетельства об актуальности дальнейшего исследования вопроса о температурных воздействиях в условиях изменения климата с применением ансамблевого подхода и привлечением статистических методов интерпретации¹⁶⁵.

Важное проявление температурных воздействий на сооружения связано с частыми переходами температуры воздуха через 0°C . 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.

¹⁶³ Свод правил СП20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. — М., Минстрой России, 2016, 96 с.; Свод правил СП131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М., Минстрой России, 2018, 386 с.

¹⁶⁴ 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; 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>

¹⁶⁵ Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации, 2005. — СПб: Гидрометеиздат, 319 с.

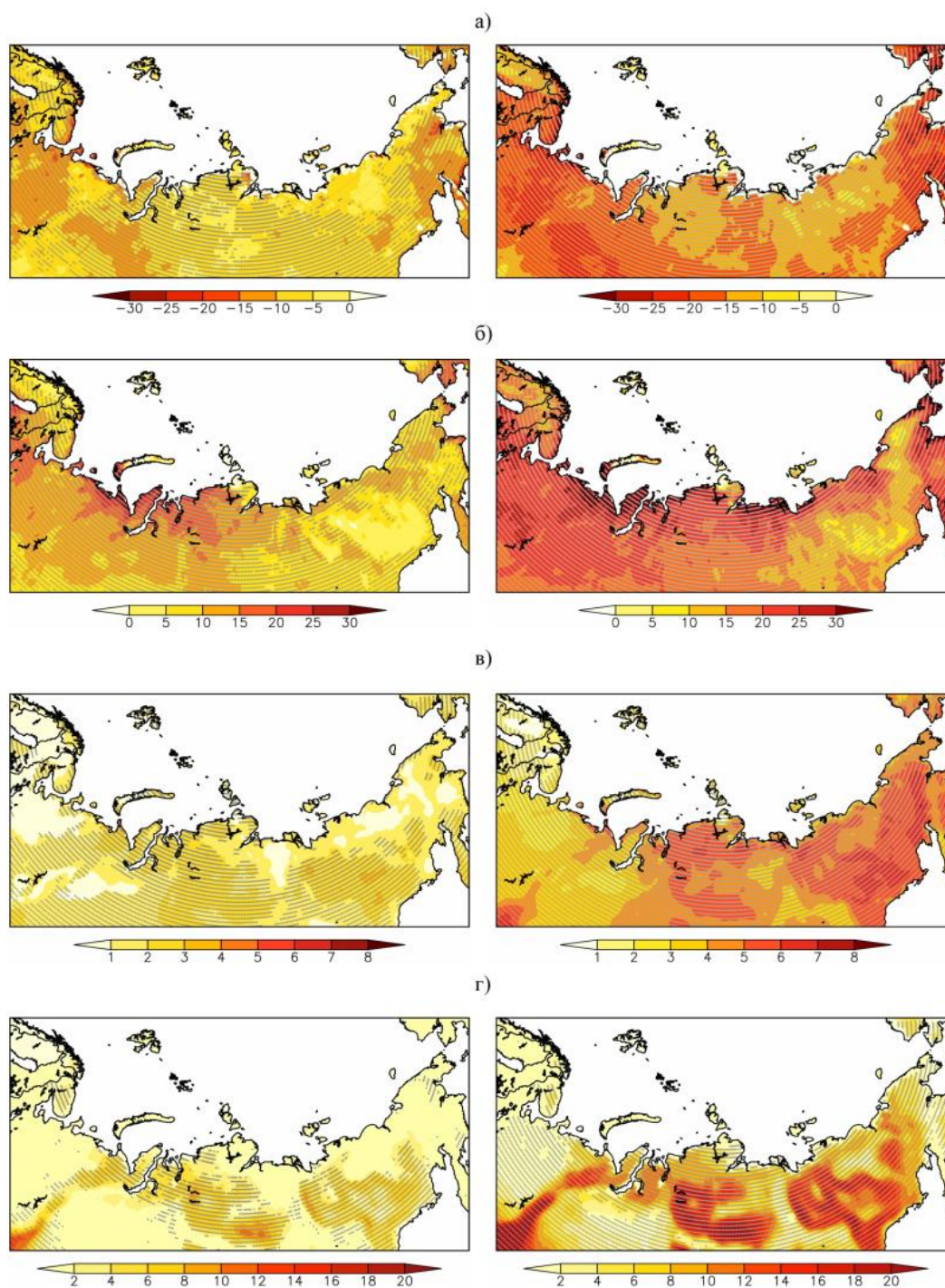


Рис. ПЗ.4. Изменение средних многолетних значений показателей термического режима теплого периода года к середине XXI в. (слева) и концу XXI в. (справа) по отношению к базовым значениям за 1981—2000 гг. (РКМ ГГО; сценарий RCP8.5):

- а — дата устойчивого весеннего перехода через $+5^{\circ}\text{C}$ (дни);
- б — дата устойчивого осеннего перехода через $+5^{\circ}\text{C}$ (дни);
- в — годовой максимум средней суточной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$);
- г — число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше $+25^{\circ}\text{C}$.

На протяжении XXI в. этот отрицательный эффект потепления будет в наибольшей степени проявляться на Европейской территории и, в частности, в Западной Арктике (рис. ПЗ.3в).

Существенным негативным фактором, воздействующим на транспортную инфраструктуру, является рост количества и интенсивности осадков (рис. ПЗ.2). Особенно высокие риски связаны с увеличением экстремальных суточных сумм осадков в теплый сезон (рис. ПЗ.2з), которые приводят к потере устойчивости склонов, возникновению оползней и разрушению объектов.

Портовая инфраструктура. Стратегия развития Северного морского пути и его использование 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. ПЗ.1а), 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. ПЗ.4г), 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. П.2.2е, з) и продолжительности гроз приведут к увеличению простоев портовых кранов.

Особо следует упомянуть об уязвимости портовых объектов в Арктике под воздействием деградации вечной мерзлоты. В работах, выполненных на основе системы моделей разного разрешения,¹⁶⁶ обращается внимание на более значительное протаивание песчаных грунтов, которые характерны для русел рек в северной части Западной Сибири и на Ямале.

¹⁶⁶ Надежина Е. Д., Орленко Л. Р., Пикалева А. А.: 2013: Оценки эволюции теплового состояния многолетнемерзлых грунтов на побережье Арктических морей с использованием системы моделей разного пространственного масштаба // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 569, с. 62—74; Пикалева А. А., Надежина Е. Д., Стернзат А. В. и др., 2016: Исследование эволюции вечной мерзлоты на территории России с помощью моделей пограничного слоя атмосферы и теплопередачи в грунтах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 581, с. 24—40.

Лесопромышленный комплекс. Арктическая зона России обладает многими видами ресурсов международного значения. К ним относятся и лесные ресурсы, основная часть которых находится в Архангельской области. Лесозаготовка и обработка древесины занимают здесь важное место в структуре экономики, 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. ПЗ.1), увеличение продолжительности вегетационного сезона (рис.ПЗ.4)), определенные региональные особенности потепления оказывают негативное влияние на лесные сообщества. Следует отметить не только увеличение вклада экстремально-высоких летних температур, но и растущее число оттепелей в холодный сезон, а также сокращение количества осадков, выпадающих при отрицательной температуре (рис.ПЗ.2б), что приводит к уменьшению снегонакопления и ухудшению влагообеспеченности растительности. В этих условиях возрастают риски возникновения лесных пожаров, а также риски массового размножения вредителей и распространения болезней леса. Для более глубокого понимания адаптационного потенциала и обоснования необходимых лесохозяйственных мероприятий целесообразно проведение дальнейших исследований с привлечением детализированных описаний процессов тепло- и влагопередачи в почве и соответствующих моделей отклика растительных экосистем.

Сельское хозяйство и условия жизни населения. 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 (рис. ПЗ.4а, б), 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. ПЗ.1а), увеличение числа переходов температуры через нулевую отметку (рис. ПЗ.3в), а также рост количества осадков (рис. ПЗ.2), могут иметь негативные последствия, проявляющиеся в затруднениях перемещения оленей между пастбищами, а также в сложностях добывания оленями корма из-за образования на снегу ледяной корки.

Уменьшение суровости климата¹⁶⁷, создающее предпосылки для более комфортного проживания населения в регионе, является наиболее выраженным в Восточной Арктике (рис. ПЗ.1б). Значительно уменьшается число дней с экстремально низкими и опасными для здоровья человека температурами воздуха (рис. ПЗ.1в), растет число дней с температурой в диапазоне от -5°C до -15°C, который рассматривается в биоклиматологии¹⁶⁸ как наиболее благоприятный для прогулок и занятий зимними видами спорта (рис. ПЗ.3г). В Западной Арктике потепление

¹⁶⁷ Заболотник С. И., 2010: Суровость климатических условий на территории России // География и природные ресурсы, № 3, с. 69—74.

¹⁶⁸ Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации, 2005. — СПб, Гидрометеиздат, 319 с.

в холодный период года сопровождается негативными проявлениями: возрастает число дней с переходом температуры воздуха через нулевую отметку (рис. ПЗ.3в), уменьшается число зимних дней с благоприятными для рекреации температурными условиями (рис. ПЗ.3г).

Рост летних экстремумов и увеличение числа дней с жаркой погодой (рис. ПЗ.4в, г) негативно отразится на экологической обстановке в промышленных районах и состоянии здоровья населения. Высокие климатические риски для населения, его среды обитания и здоровья, 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 вечной мерзлоты).

Таким образом, анализ результатов расчетов, выполненных на основе данных регионального моделирования, дал возможность получить детализированное представление об ожидаемых особенностях климатических изменений на территории российской Арктики с точки зрения перспективы использования этой информации на этапе разработки инвестиционных проектов и адаптации территории к изменениям климата. Основное внимание уделено характеристикам приземной температуры воздуха и осадков, базирующимся на модельных данных высокого временного разрешения, которые представляют первоочередной интерес в контексте развития ключевых сегментов экономики в регионе.

Более полное представление об изменении климатического воздействия на различные объекты и виды хозяйственной деятельности в регионе предполагает расширение круга анализируемых переменных с учетом возможностей современных климатических моделей в отношении их воспроизведения.