ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОСГИДРОМЕТА

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ:
МЕСТО КЛИМАТИЧЕСКОЙ НАУКИ В ПЛАНИРОВАНИИ АДАПТАЦИИ

Санкт-Петербург

2017

УДК 551.583(985)+338
ББК 26.237(21)+65.28
И37

Изменения климата Арктики: место климатической науки в планировании адаптации / [В.М. Катцов, Б.Н. Порфирьев; под редакцией доктора физико-математических наук В.М. Катцова]; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Климатический центр Росгидромета. – Санкт-Петербург: Д′АРТ: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. 2017. – 104 с.: с ил.

ISBN 978-5-9500883-3-9

I. Катцов, В.М. II. Российская Федерация. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды III. Климатический центр

В настоящей монографии в контексте обсуждения места, занимаемого климатической наукой в процессе планирования адаптации к изменениям климата, представлены результаты оценки климатических изменений и их последствий в российской Арктике, а также подходы к развитию региональных и отраслевых стратегий адаптации к этим последствиям.

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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 15-02-00528).

Под редакцией

доктора физико-математических наук В. М. Катцова

Авторский коллектив:

В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев, В. А. Говоркова, Д. О. Елисеев, С. В. Ефимов, А. А. Киселев, В. П. Мелешко, Т. В. Павлова, А. А. Пикалева, Б. А. Ревич, П. В. Спорышев, Н. Е. Терентьев, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник

ISBN 978-5-9500883-3-9

© Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ФГБУ «ГГО»), 2017
© Коллектив авторов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…… 4

1. Изменения климата Арктики……..... 7

   1.1 Наблюдаемые изменения климата Арктики……... 7

   1.2 Оценки ожидаемых изменений климата Арктики на основе расчетов с глобальными моделями……..…. 15

2. Детализированные оценки ожидаемых климатических воздействий в Арктической зоне Российской Федерации……..…. 52

   2.1. Ожидаемые климатические воздействия на условия жизни населения…… 54

   2.2. Ожидаемые климатические воздействия на отрасли экономики…… 60

   2.3. Дальнейшие шаги в оценке региональных климатических воздействий…… 67

3. Адаптация населения и экономики к ожидаемым климатическим изменениям в российской Арктике…… 69

   3.1. Концептуальные подходы к управлению климатическими рисками социально-экономического развития российской Арктики……. 70

   3.2. Роль адаптации в системе приоритетов государственной политики развития Арктической зоны Российской Федерации.. 72

   3.3. Защита населения и территорий Арктической зоны Российской Федерации в рамках адаптации к климатическим изменениям……. 75

   3.4. Особенности и перспективы адаптации строительного сектора Арктической зоны Российской Федерации к климатическим изменениям……... 78

   3.5. Корпоративные стратегии адаптации бизнеса к климатическим изменениям: возможности для социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации…….. 82

4. Арктика в контексте гранд-вызовов, стоящих перед климатической наукой…… 84

   4.1. Гранд-вызовы Всемирной программы исследований климата..... 84

   4.2. Ожидаемые климатические изменения в Арктике: открытые вопросы……. 90

   4.3. Некоторые проблемы использования климатических данных в практических приложениях…….. 92

Заключение……. 94

Библиография…… 95

Введение

Выводы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[1] о не вызывающем сомнения глобальном потеплении климата, которое происходит в настоящее время, продолжают находить подтверждение в данных наблюдений. При этом, согласно данным Росгидромета[2], на территории России в последние десятилетия потепление климата происходило быстрее и масштабнее, чем в среднем по Земному шару. Так, скорость современного роста глобальной температуры, вызванного в основном увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, составила за последние сорок лет около 0,17 ºС за 10 лет. Температура на территории России растет значительно быстрее: 0,45 ºС за 10 лет, и особенно быстро в Арктике, где скорость роста местами достигает 0,8 ºС за 10 лет (Таймыр).

Согласно современным научно обоснованным прогнозам, в том числе приведенным в оценочных докладах Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008 и 2014 гг.)[3], наблюдаемые тенденции в изменении климата, в том числе – в российской Арктике, с высокой степенью вероятности сохранятся и, в ряде аспектов, усугубятся.

Арктический регион обоснованно привлекает внимание ученых, представителей бизнес-сообщества и политиков из разных стран мира. Особое внимание климатологов к этому региону обусловлено рядом причин. Среди них можно отметить высокую скорость происходящих здесь изменений, которая проявляется на фоне сильной естественной изменчивости, а также потенциальное воздействие региональных изменений на глобальный климат, механизмы которого являются предметом дальнейших научных исследований.[4]

В силу сложной структуры климатической изменчивости в Арктике модельные оценки ожидаемых изменений для этого региона характеризуются относительно большим разбросом и их целесообразно интерпретировать на

[1] http://ipcc.ch

[2] Здесь и далее: Росгидромет, 2017: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Росгидромет, М., 2017, 70 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/doc2016.pdf

[3] Здесь и далее, соответственно: Росгидромет, 2008, и Росгидромет, 2014: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Бедрицкий А.И. и др., ред.), Росгидромет, 2008, т. 1 (230 с.) и т. 2 (291 с.): http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-22-13-06-34; Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., Семенов С.М., ред.), Росгидромет, 2014, 1009 с.: http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52

[4] Катцов В.М., Павлова Т.В., 2015: Арктика в контексте «гранд-вызовов» климатической науке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 579. С. 66–78.

основе вероятностного подхода.[5] В Докладе[6], подготовленном в рамках Программы арктического мониторинга и оценки (AMAP), отмечаются «стремительные» изменения климата Арктики и обращается внимание на высокую вероятность сохранения ускоренного потепления Арктического региона.

С точки зрения развития национальной экономики – с учетом геополитических реалий – территории, относящиеся к Арктической зоне Российской Федерации, представляют стратегический интерес. Экономический потенциал российской Арктики – и Западной, и Восточной ее частей – оценивается специалистами достаточно высоко.[7] Это связано не только с большими прогнозными запасами углеводородов в регионе, но и с ожидаемыми климатическими изменениями, которые предположительно приведут к облегчению доступа в Арктику, включая возрастание значимости Северного морского пути как трансконтинентального транспортного коридора и усилению роли крупных судоходных рек бассейна Северного Ледовитого океана.

С одной стороны, такая концепция предполагает разработку в ближней и среднесрочной перспективе крупных инвестиционных проектов, которые потребуют значительных финансовых вложений. Реализация этих проектов сопряжена с разного рода рисками, среди которых особое место занимают климатические риски.[8] Хозяйственная деятельность, включая сухопутный и морской транспорт, добычу полезных ископаемых, нефте- и газоразведку, производство энергии и т.п., должна учитывать изменения и колебания климата в планировании.

---

[5] Елисеев А.В., Семёнов В.А., 2016: Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // *Доклады Академии Наук*. Том 471. № 2. С. 214–218; Спорышев П.В., Катцов В.М., Говоркова В.А., 2016: Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 583, С. 45–84.

[6] Snow, Water, Ice and Permafrost. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2017, 20 pp.

[7] 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.

[8] Катцов В.М., Порфирьев Б.Н., 2012: Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // *Арктика: экология и экономика.*№ 2 (6). С. 66–79; Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., 2016: Эколого-климатические риски социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации // *Экологический вестник России.* № 1. С. 44–51; Порфирьев Б.Н., Хлебникова Е.И., 2015: Строительство в условиях изменений климата в Арктике: риски и возможности их снижения // *Экономика строительства*. № 6. С. 4–15; Катцов В.М. (ред.), 2017: Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Климатический центр Росгидромета. 106 с.; Порфирьев Б.Н. (ред.), 2017: Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата. М: Научный консультант. 304 с.

С другой стороны, быстрые изменения климата Арктики влияют на традиционные уклады жизни, здоровье и безопасность; угрожают биологическим видам и экосистемам на суше, в пресных и морских водах. Все это предполагает планирование самых серьезных мер для смягчения быстро нарастающих климатических стрессов, а также, потенциально, и крайне опасных экологических стрессов, сопровождающих упомянутое расширение экономической и прочей деятельности в этом – одном из наиболее уязвимых регионов планеты.

Таким образом, Арктика становится одним из важнейших объектов долгосрочных стратегий адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата. Научное обоснование таких стратегий является ключевой задачей планирования на любом уровне: национальном, отраслевом, региональном и в качестве основного этапа планирования адаптации любого объекта (хозяйственного комплекса, вида экономической деятельности, территории) включает количественные оценки современных и будущих погодно-климатических рисков, в том числе: текущего состояния климатической системы и сценариев будущих изменений климата; подверженности и уязвимости объекта под риском; допустимых значений рисков с учетом экономических и социальных факторов.[9]

Благодаря достижениям климатической науки возможности для такого анализа на сегодняшний день постепенно расширяются[10]. В настоящей монографии применительно к российской Арктике обсуждаются некоторые новые перспективы использования сложных климатических моделей с целью научного обоснования адаптационных стратегий – в части детализации перспективных (т.е. прогнозных) оценок изменения климата и соответствующих климатических воздействий как в физическом, так и в вероятностном пространствах.

[9] 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.

[10] См., например, AMAP. *Adaptation Actions for a Changing Arctic – Barents Region Overview Report 2017*. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017) https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604; AMAP. *Adaptation Actions for a Changing Arctic – Baffin Bay/Davis Strait Region Overview Report 2017*. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017); AMAP. *Adaptation Actions for a Changing Arctic – Bering/Chukchi/Beaufort Region Overview Report 2017*. (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017) https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Bering-Chukchi-Beaufort-Region/1615.

1. Изменения климата Арктики[11]

1.1 Наблюдаемые изменения климата Арктики

В течение последних десятилетий климатическая наука достигла существенных успехов в объяснении наблюдаемых изменений климата. 2014 г. стал завершающим годом для пятого цикла оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[12]. Одним из сильных впечатлений, которые оставляет вклад первой рабочей группы МГЭИК в 5-й оценочный доклад[13] в целом, является возросшая уверенность в ряде ключевых оценок, опубликованных МГЭИК в последнюю четверть века. К числу фундаментальных вопросов, на которые наука сегодня дает уверенный утвердительный ответ, относятся, например, следующие: изменяется ли химический состав атмосферы; теплеет ли вследствие этого климат; ответственна ли за это хозяйственная деятельность человека.

Согласно данным Всемирной Метеорологической Организации (ВМО)[14], 2016 г. с высокой вероятностью является самым теплым годом за весь период инструментальных наблюдений. Годом ранее ВМО объявила 2011–2015 гг. самым теплым пятилетием за тот же период[15]. А МГЭИК в вышеупомянутом 5-м оценочном докладе[16] показала, что каждое из последних (предшествующих публикации доклада) трех десятилетий было последовательно более теплым у поверхности Земли, по сравнению с любым предыдущим десятилетием, начиная с 1850 г. При этом в северном полушарии период 1983–2012 гг. был, ***вероятно***[17]*,* самым теплым 30-летием за последние 1400 лет. По сравнению с

---

[11] Настоящий раздел является адаптированной и дополненной версией работы Катцов В.М., Киселев А.А., Мелешко, В.П., Павлова Т.В., 2017: Глобальные изменения климата и основные сценарии и особенности изменений климата в Арктике: модели, оценки, прогнозы / В кн. *«Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата»* /под ред. акад. Б.Н. Порфирьева. М: Научный консультант. С. 17—52.

[12] http://www.ipcc.ch/

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

[14] Здесь и далее: ВМО, 2017: Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2016 году. Всемирная метеорологическая организация, 2017, ВМО-№ 1189, 24 с. http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414

[15] ВМО, 2016: The global climate in 2011-2015. WMO-№. 1179, 28 pp.

[16] IPCC, 2013

[17] Здесь и далее в этом разделе (выделено курсивом) используется «шкала» качественных оценок вероятности (достоверности), применяемая в IPCC, 2013.

доиндустриальным периодом[18], среднегодовая среднеглобальная температура в 2016 г. выросла на 1,1 °C, незначительно превзойдя (на 0,06 °C) ее значение в 2015 г. (рис. 1.1).

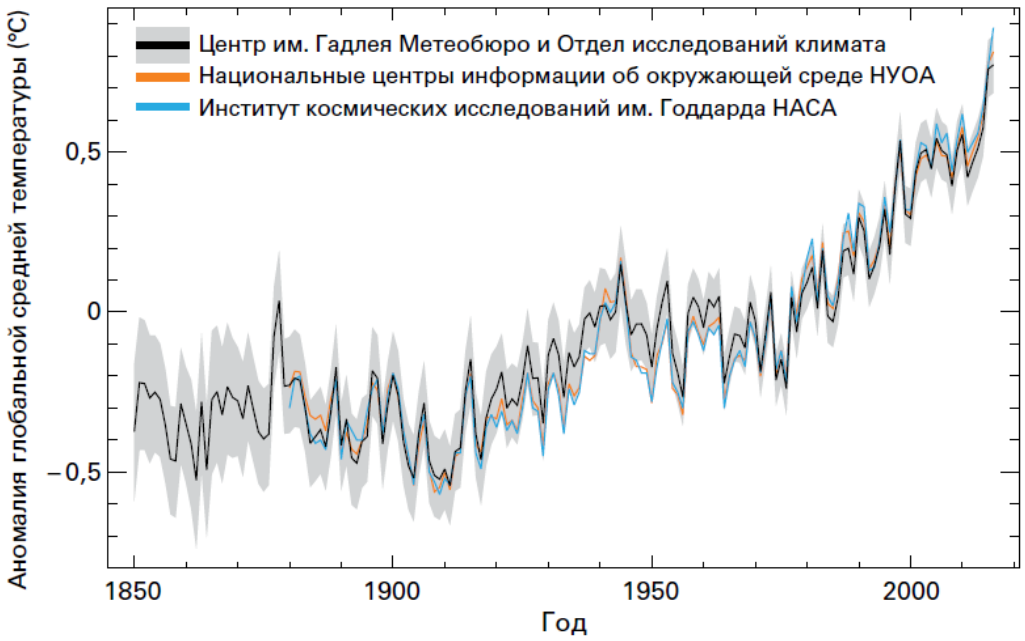

Рис. 1.1. Годовые аномалии средней глобальной температуры (относительно средней за 1961–1990 гг.) за период 1850–2016 гг. Черная линия и затененная серым цветом зона получены на основе анализа HadCRUT4, проведенного Центром им. Дж. Гадлея Метеобюро совместно с Отделом исследований климата Университета Восточной Англии. Серое затенение показывает 95-процентный доверительный интервал оценок. Оранжевая линия — это комплект данных NOAAGlobalTemp, подготовленный национальными центрами информации об окружающей среде Национального управления по исследованию океанов и атмосферы США. Голубая линия — это комплект данных GISTEMP, подготовленный Институтом космических исследований им. Р. Годдарда при Национальном управлении по аэронавтике и исследованию космического пространства. (Источник: Центр им. Дж. Гадлея Метеобюро, Соединенное Королевство, и Отдел исследований климата, Университет Восточной Англии, Соединенное Королевство).[19]

Одновременно в атмосфере продолжался рост концентраций главных парниковых газов (диоксида углерода, метана, закиси азота), которые также достигли беспрецедентно высоких уровней, по меньшей мере, за последние 800 тысяч лет (судя по косвенным оценкам, основанным на анализе данных палеонаблюдений)[20]. При этом, с весьма высокой степенью достоверности, средние темпы роста атмосферных концентраций в последнее столетие не имеют

[18] Существует несколько определений доиндустриального периода. Наиболее часто используются периоды 1850–1899 гг. и 1880–1899 гг.
[19] ВМО, 2017
[20] IPCC, 2013

прецедентов за 22 тыс. лет. В 2016 г. концентрация диоксида углерода достигла уровня 403,3 частиц на миллион (млн$^{-1}$)[21], что, по оценке ВМО (2017), на 45 % больше ее значений в доиндустриальный период. Согласно заключению МГЭИК, этот рост является результатом, в первую очередь, выбросов от сжигания ископаемого топлива, и, во-вторых, изменений в землепользовании. На поглощение океаном приходится около 30 % антропогенных выбросов двуокиси углерода, что приводит к закислению океана. Соответствующие превышения над доиндустриальными уровнями для метана и закиси азота, по оценкам ВМО (2017), составляют 157 и 22 %.

Соответственно, суммарное радиационное воздействие является положительным, т. е. климатическая система поглощает энергию. Самый значительный вклад в суммарное радиационное воздействие вносит повышение концентрации CO_2 в атмосфере с середины XVIII века.

Не вызывающее сомнений (по заключению МГЭИК) глобальное потепление проявляется, помимо разогрева атмосферы, в увеличении теплосодержания океана, уменьшении объемов снега и льда, повышении уровня моря. На долю океана приходится более 90 % энергии, аккумулированной климатической системой в последние десятилетия[22]. За последние два десятилетия сократилась масса Гренландского и Антарктического ледниковых щитов. Площади и объем ледников продолжали сокращаться практически во всем мире. Темпы повышения уровня моря с середины XIX века с высокой степенью достоверности превысили средние темпы за предыдущие два тысячелетия. За период 1901–2010 гг. средний глобальный уровень океана повысился на 0,19 м.[23]

Выявить причины изменений климата позволяют сопоставления наблюдаемых изменений и реакции на предполагаемые внешние воздействия, полученной с помощью сложных климатических моделей. При этом применяются статистические процедуры, позволяющие объективно установить, согласуются ли количественно изменения, фиксируемые в климатической системе, с изменениями, полученными в модельных расчетах. Помимо этого, осуществляется проверка, не могут ли наблюдаемые изменения быть вызваны другими физическими механизмами: например, не являются ли они проявлением присущей климатической системе собственной изменчивости. МГЭИК (2013)

[21] WMO, 2017: WMO Greenhouse Gas Bulletin. №.13, 30 October 2017, 8 pp. https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_EN_final_1_1.pdf
[22] IPCC, 2013
[23] IPCC, 2013

констатирует, что с вероятностью более 95 % влияние человека было доминирующей причиной потепления, наблюдающегося с середины XX века. Согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе (включая приземную температуру воздуха, температуру тропосферы и стратосферы, глобальные влагооборот и баланс энергии, криосферу и Мировой океан) указывает на то, что наблюдаемые изменения климата связаны, в первую очередь, с увеличением концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере. При этом отклик «модельной» климатической системы на внешние воздействия в виде изменений состава атмосферы во многом согласуется с реальным географическим распределением изменений климата.

Согласно заключению МГЭИК (2013), на каждом континенте, за исключением Антарктиды (где не хватает данных наблюдений), антропогенные воздействия внесли, *вероятно*, существенный вклад в потепление у поверхности Земли с середины XX века. *Вероятно* также, что с середины XX века деятельность человека способствовала значительному потеплению в Арктике. Кроме того, за этот же период с высокой вероятностью антропогенное влияние, особенно рост содержания парниковых газов и истощение стратосферного озона, привело к установлению наблюдаемой структуры потепления в тропосфере с одновременным охлаждением нижних слоев стратосферы.

На сегодняшний день оценки связи с антропогенными воздействиями зафиксированных повышения теплосодержания верхнего слоя Мирового океана (0–700 м), изменений глобального гидрологического цикла, повышения содержания влаги в атмосфере, глобального изменения режима осадков над сушей, увеличения интенсивности сильных осадков над регионами, достаточно освещенными данными наблюдений, изменений солености поверхностного и подповерхностного слоев океана варьируют от вероятных до весьма вероятных. К такому же диапазону вероятности относятся оценки влияния хозяйственной деятельности человека на наблюдаемые с середины XX века глобальные изменения повторяемости и интенсивности суточных экстремумов температуры; на уменьшение площади морского льда в Арктике и снежного покрова суши в Северном полушарии весной; на отступление ледников, а также на уменьшение массы Гренландского ледникового щита и на повышение глобального среднего уровня моря. *Вероятно* также, что влияние деятельности человека более чем удвоило вероятность возникновения волн тепла в некоторых регионах.

При этом, существует *высокая степень достоверности* в отношении того, что изменение суммарной солнечной радиации не оказало влияния на повышение средней глобальной приземной температуры в период 1986–2008 гг., исходя из прямых спутниковых измерений суммарной солнечной радиации. Со *средней степенью достоверности* 11-летний цикл солнечной активности оказал влияние на внутривековые климатические колебания в некоторых регионах. Не было выявлено никакой явной взаимосвязи между изменениями интенсивности космических лучей и облачным покровом.[24]

Согласно данным Росгидромета (2017)[25], значение пространственно осредненной аномалии среднегодовой температуры воздуха Северной полярной области (60–90 ° с. ш.) составило 3,3 °С, и 2016 г. стал наиболее теплым годом за период с 1936 г. В течение 1936–2016 гг. наблюдается статистически значимый (на 5 %-ном уровне значимости) положительный линейный тренд среднегодовой температуры в целом для Северной полярной области и для отдельных широтных зон (60–70 и 70–85° с. ш.). Линейное (по тренду) повышение температуры воздуха за 81 год в этих широтных зонах составило 1,38 °С, 1,38 °С и 1,46 °С, соответственно. Для Северной полярной области в целом значимый положительный тренд обнаруживается во все сезоны.

В течение последних тридцати лет (1987–2016 гг.) в целом для Северной полярной области линейный рост среднегодовой температуры составил 0,79 °С/10 лет. На акваториях арктических морей в течение 1936–2016 гг. знак тренда повсеместно положительный. В последнее 30-летие повышение температуры особенно быстро происходит в районе Карского моря. Повышение среднегодовой температуры воздуха здесь составляет 5,1 °С за 30 лет (т. е. 1,7 °С/10 лет).

В изменениях годовых сумм осадков за период 1936–2016 гг. в Северной полярной области наблюдается тенденция их статистически значимого увеличения со средней скоростью около 3 мм/10 лет. При этом рост осадков преимущественно отмечается в канадско-европейском секторе, включая Атлантику, и, в основном, в холодный период года. Тенденция к убыванию осадков обнаруживается в районе Чукотки в течение всего года и на акваториях арктических морей азиатского сектора Северной полярной области в теплый период года. Более всего рост осадков выражен в южной части

[24] IPCC, 2013

[25] Здесь и далее: Росгидромет, 2017: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. – Москва. 2017. 72 с.

Североевропейского района (14,9 мм/10 лет для осадков холодного периода и 18,2 мм/10 лет для годовых сумм), а уменьшение – в Восточно-Сибирском и Чукотском морях (12,2 и 13,5 мм/10 лет для годовых сумм осадков, соответственно).

2016 г. в морской части Арктики также оказался самым теплым за период наблюдений с 1951 г., превзойдя на 0,7 °С самый теплый до этого 2012 г. (рис. 1.2).

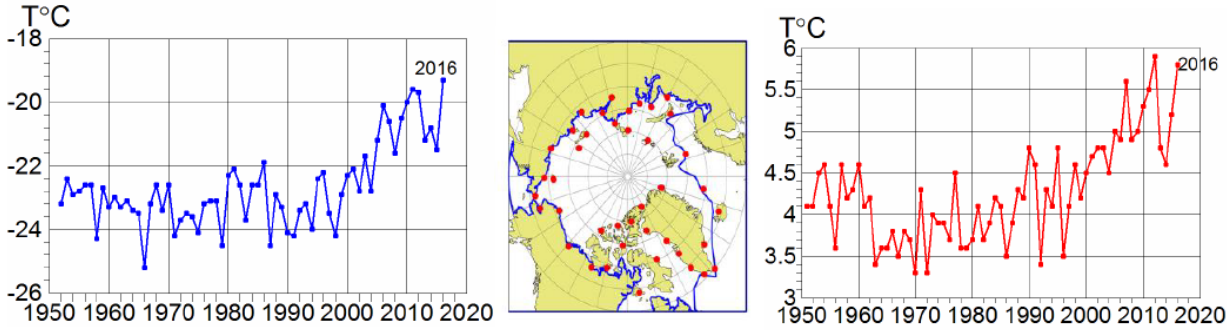

Рис. 1.2. Средняя за декабрь–февраль (слева) и за июнь–август (справа) приземная температура воздуха на 41 станции в Морской Арктике (в центре) в 1951–2016 гг. Точки на карте – положение станций.[26]

За последние пять десятилетий Арктика потеплела в два раза больше, чем планета в среднем. Наблюдавшееся в начале XXI столетия замедление глобального потепления, известное в литературе как «hiatus», в Арктике не было выражено. При этом сильное потепление Арктики происходило на фоне интенсивной собственной пространственно-временной изменчивости – хорошо известной особенности климатической системы в высоких широтах, маскирующей антропогенный сигнал.

Наблюдающееся в последние десятилетия интенсивное сокращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана является не только одним из ключевых индикаторов, но и фактором изменения климата, благодаря соответствующим положительным обратным связям, действующим в климатической системе. Особенно быстро сокращается минимальная в сезонном цикле – сентябрьская – площадь морского льда, что говорит о постепенном исчезновении многолетнего льда в Северном Ледовитом океане и превращении ледяного покрова океана в сезонный (рис. 1.3). За период спутниковых, т. е. наиболее надежных, наблюдений за площадью морского льда в Арктике (с конца

[26] Росгидромет, 2017

1970-х гг.) его площадь в сентябре сокращается в среднем на 13,2 % за десятилетие (по отношению к среднему значению за период 1981–2010 гг.)[27]. Максимальная в сезонном ходе площадь морского льда сокращается со скоростью 2,7 % за десятилетие (по отношению к тому же базовому периоду).[28]

Согласно оценкам, полученным на основе анализа доступных данных наблюдений, средняя толщина морского льда в центральной части Северного Ледовитого океана за период 1975–2012 гг. уменьшилась почти на две трети – с 3,6 до 1,3 м[29]. На акватории Северного Ледовитого океана сокращение количества дней с наличием морского льда с 1979 г. по 2013 г. составило, примерно, 20 дней за десятилетие, с наибольшим сокращением (порядка 100 дней) в Баренцевом, а также Чукотском и Восточно-Сибирском морях[30]. Температура поверхности большинства арктических окраинных морей повышается[31]. Более теплая вода проникала в Северный Ледовитый океан из Атлантического и Тихого океанов. Пульсирующий приток все более теплых атлантических вод через пролив Фрама и Баренцево море зафиксирован в ряде исследований[32]. Берингово и Баренцево моря особенно заметно потеплели в 2015 и 2016 гг.

В последние годы протяженность снежного покрова в Северном полушарии в июне уменьшилась примерно в два раза, по сравнению с 1980-ми гг. Однако в холодный сезон (ноябрь–январь) статистически значимых изменений площади снега в масштабах полушария пока не наблюдается.

С 2007–2008 гг. во многих местах имеют место рекордные повышения средней годовой температуры многолетнемерзлых грунтов в верхнем трехметровом слое. При этом наибольшее потепление (свыше 0,5 °C) наблюдается в самых холодных регионах – в Арктике.

---

[27] (С учетом сентября 2017 г.) Национальный центр данных о снеге и льде США, 2017: http://nsidc.org/arcticseaicenews/2017/10/

[28] (С учетом марта 2016 г.) Национальный центр данных о снеге и льде США, 2017: http://nsidc.org/arcticseaicenews/2017/04/

[29] Lindsay, R. and Schweiger, A., 2015. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *The Cryosphere*, 9(1), pp. 269–283.

[30] Parkinson, C.L., 2014: Spatially mapped reductions in the length of the Arctic sea ice season. *Geophysical Research Letters*, 41(12), pp. 4316–4322.

[31] Timmermans, M.-L., and A. Proshutinsky, 2014: Arctic Ocean sea surface temperatures. Arctic Report Card: Update for 2014, http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/sea_surface_temperature.html

[32] Alexeev, V.A., V.V. Ivanov, R. Kwok and L.H. Smedsrud, 2013: North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice. *The Cryosphere* Discuss., 7, pp. 245-265. doi:10.5194/tcd-7-245/2013/; Dmitrenko, I.A., S.A. Kirillov, N. Serra, N.V. Koldunov, V.V. Ivanov, U. Schauer, I.V. Polyakov, D. Barber, M. Janout, V.S. Lien et al., 2014: Heat loss from the Atlantic water layer in the northern Kara Sea: causes and consequences. *Ocean Science*. 10(4): pp. 719–730; Carmack, E., I. Polyakov, L. Padman, I. Fer, E. Hunke, J. Hutchings, J. Jackson, D. Kelley, R. Kwok, C. Layton, H. Melling, D. Perovich, O. Persson, B. Ruddick, M.-L. Timmermans, J. Toole, T. Ross, S. Vavrus, and P. Winsor, 2015: Toward Quantifying the Increasing Role of Oceanic Heat in Sea Ice Loss in the New Arctic. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, pp. 2079–2105. doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00177.1

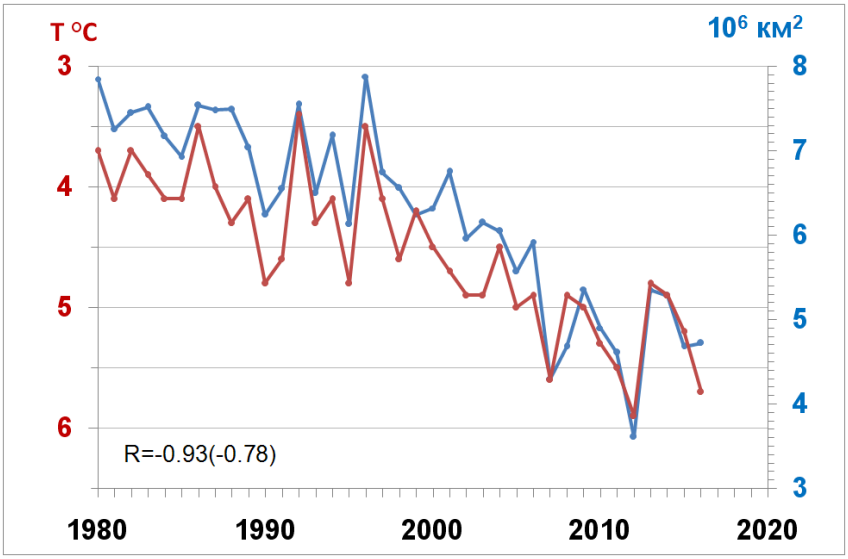

Рис. 1.3. Средняя площадь морского льда в сентябре в Северном Ледовитом океане по данным ААНИИ[33] и летняя приповерхностная температура воздуха в морской Арктике в 1980–2016 гг. R – коэффициент корреляции между площадью льда и температурой воздуха. В скобках – то же для отклонений от квадратичного тренда.[34]

В более умеренных климатических условиях потепление грунта меньше, либо не наблюдается. Отмечается более позднее замерзание деятельного слоя почвы.

Наряду с глобальным потеплением и сокращением ледяного покрова в Арктике за последние два десятилетия возросла повторяемость экстремально холодных режимов погоды зимой в Северной Евразии и Северной Америке. Эти необычные режимы, обусловленные особенностями перестройки атмосферной циркуляции, часто связывают с усилением арктического потепления и сокращением ледяного покрова.

В ряде исследований аномальные сокращения ледяного покрова в Баренцевом море и реакция на них атмосферы рассматриваются как один из важнейших факторов, вызывающих экстремально холодные зимы в Северной Евразии. В частности, чрезвычайно суровая зима 2005–2006 гг. в Европе и Сибири могла быть вызвана изменениями сплоченности льда зимой в Баренцевом/Карском морях[35]. Согласно анализу данных реанализа NCEP за

[33] http://www.aari.ru/datasets
[34] Росгидромет, 2017
[35] Petoukhov V., V.A. Semenov, 2010: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009jd013568; Сплоченность

период 1979–2011 гг., изменения площади льда в Баренцевом море определяют траектории циклонов. Смещение к северу траекторий циклонов усиливает антициклональную циркуляцию на побережье Сибири, вызывая адвекцию холодного воздуха над северными регионами Сибири. Траектории циклонов при малых значениях сплоченности льда в Баренцевом море являются основным механизмом, генерирующим теплые аномальные режимы в Арктике и холодные в Сибири[36]. Тем не менее, вопрос о том, являются ли время от времени наблюдаемые похолодания в Северной Евразии результатом сокращения ледяного покрова в Арктике, или такие режимы погоды вызваны естественной долгопериодной изменчивостью климатической системы, остается пока открытым.

1.2 Оценки ожидаемых изменений климата Арктики на основе расчетов с глобальными моделями

Сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему

Для перспективных оценок изменений климата, получаемых на основе расчетов с климатическими моделями, основное значение имеют сценарии эволюции содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере в будущем, а порождающие ее социально-экономические условия не используются непосредственно в модельных расчетах. С этой целью применяется индекс радиационного воздействия, отражающий степень внешнего (в том числе антропогенного) воздействия на климатическую систему. 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[37]. Индекс сценария соответствует величине глобального антропогенного радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно: 2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м^2 – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, соответственно. Эти сценарии сфокусированы на антропогенных выбросах и не включают изменения природных

льда – отношение площади, занятой дрейфующим льдом, к общей площади данного участка водного объекта.

[36] Inoue, J., M.E. Hori, K. Takaya, 2012: The role of Barents sea ice in the Wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. *J. Climate*, 25, pp. 2561–2568.

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

факторов, таких как солнечное или вулканическое воздействия или естественные выбросы парниковых газов.

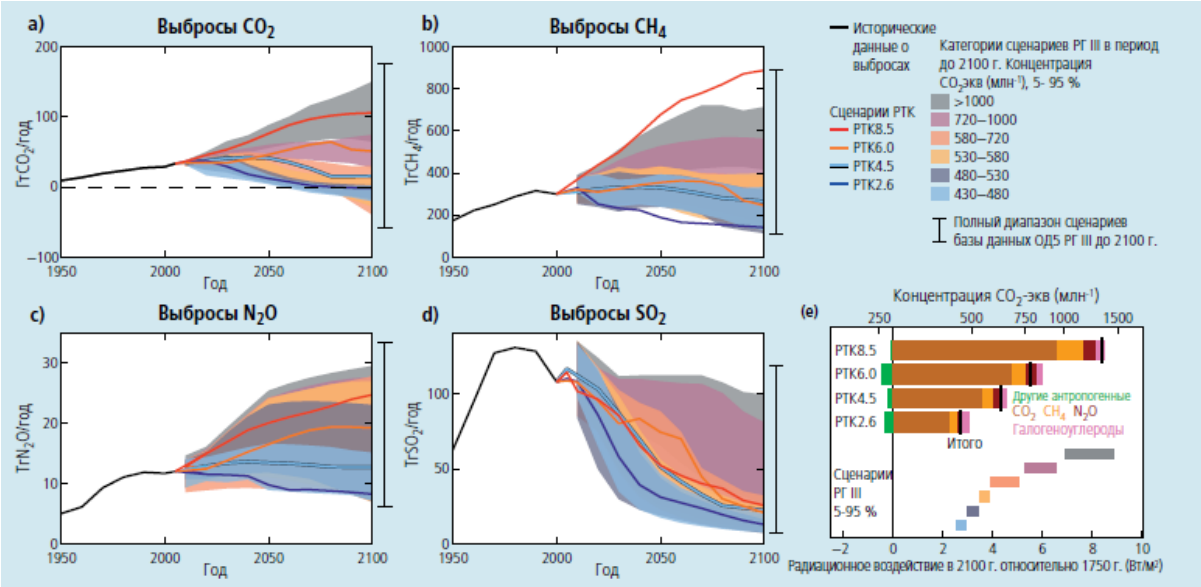

Рис. 1.4. Сценарии выбросов и соответствующие им уровни радиационного воздействия для репрезентативных траекторий концентраций (РТК (RCP), кривые) и соответствующие категории сценариев, использованных в докладе Третьей Рабочей Группы (РГ III) МГЭИК (2014)[38] (закрашенные области). Графики (a) – (d) показывают выбросы диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4), закиси азота (N_2O) и диоксида серы (SO_2). График (e) показывает будущие уровни радиационного воздействия для РТК, рассчитанные на основе использования простой климатической модели с углеродным циклом, Модели оценки изменения климата, вызванного парниковыми газами (MAGICC), для РТК (для каждого фактора воздействия) и категорий сценариев РГ III (суммарно). Категории сценариев РГ III обобщают широкий диапазон сценариев выбросов, опубликованных в научной литературе, и определяются на основе суммарных эквивалентных концентраций CO_2 (в млн$^{-1}$) в 2100 г. Вертикальные линии справа от графиков (a) – (d) показывают полный диапазон сценариев базы данных доклада РГ III. Рисунок заимствован из Синтеза Пятого оценочного доклада МГЭИК (2014)[39].

В отличие от предыдущих семейств сценариев, представленных в Специальном докладе о сценариях выбросов (т. н. «Special Report on Emission

[38] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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

Scenarios» – SRES)[40,41], сценарии RCP экстраполируются за пределы XXI века (т. н. «Extended Concentration Pathway» – ECP) – до 2300 г.

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.

Каждый сценарий RCP дает комплекты данных с высоким пространственным разрешением по изменениям в землепользовании и выбросам загрязняющих воздух веществ по секторам экономики, а также определяет среднегодовые концентрации парниковых газов и их антропогенные выбросы до 2100 г. Хотя RCP охватывают широкий диапазон значений совокупных воздействий, они не включают весь спектр выбросов, описанных в литературе, особенно по аэрозолям. Заданные уровни концентрации CO_2 достигают к 2100 г. 421 млн$^{-1}$ (RCP2.6), 538 млн$^{-1}$ (RCP4.5), 670 млн$^{-1}$ (RCP6.0) и 936 млн$^{-1}$ (RCP8.5). С учетом также заданных концентраций CH_4 и N_2O суммарные концентрации в эквиваленте CO_2 составляют 475 млн$^{-1}$ (RCP2.6), 630 млн$^{-1}$ (RCP4.5), 800 млн$^{-1}$ (RCP6.0) и 1313 млн$^{-1}$ (RCP8.5).

Согласно МГЭИК[42], продолжающиеся выбросы парниковых газов будут усиливать наблюдающиеся глобальное потепление и изменения во всех компонентах климатической системы. Для ограничения климатических изменений в будущем потребуется значительное и непрерывное снижение выбросов парниковых газов. Изменение глобальной приземной температуры в конце XXI века, *вероятно*, превысит 1,5 °C по сравнению с периодом 1850-1900 гг. во

[40] Nakićenović N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W.Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M.Schlesinger, P.Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, Z. Dadi, 2000: IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

[41] Сопоставление сценариев RCP и SRES можно найти в [Rogelj, J., M. Meinshausen and R. Knutti, 2012: Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Letters, *Nature Climate Change*. Published online: 5 February 2012 doi: 10.1038/NCLIMATE1385]; а также [IPCC, 2013], в частности, рис. 1.15). RCP4.5 близок SRES B1; RCP8.5 несколько «сильнее», чем SRES A2 к концу XXI в.; RCP2.6 – «слабее» любого сценария SRES.

[42] IPCC, 2013.

всех сценариях RCP, кроме RCP2.6. Оно превысит, *вероятно*, 2 °C в сценариях RCP6.0 и RCP8.5 и, *скорее вероятно, чем нет*, в сценарии RCP4.5. Потепление продолжится после 2100 г., согласно всем сценариям RCP, кроме RCP2.6. Потеплению в будущем будет присуща изменчивость на интервалах от года до десятилетия, и оно не будет однородным в пространстве. В глобальном гидрологическом цикле вызванные потеплением изменения в XXI веке также не будут однородными. Различия в количестве осадков, выпадающих во влажных и засушливых регионах, а также в течение влажного и сухого сезонов, усилятся, хотя могут быть исключения. Потепление Мирового океана продолжится в течение XXI века. Тепло будет проникать с поверхности в глубокие слои и оказывать влияние на океаническую циркуляцию. *Весьма вероятно*, дальнейшее сокращение протяженности и толщины морских льдов в Арктике, а также уменьшение снежного покрова в Северном полушарии в весеннее время года по мере повышения средней глобальной приземной температуры. Ожидается снижение объема ледников и, как следствие, повышение среднего глобального уровня моря в XXI веке. Причем скорость этого повышения в рамках любого из сценариев RCP, *весьма вероятно*, превысит значения, отмечавшиеся в 1971–2010 гг. Изменение климата отразится на естественном углеродном цикле, что с *высокой степенью достоверности* приведет к повышению содержания CO_2 в атмосфере. Дальнейшее поглощение углерода океаном вызовет повышение кислотности океана. Совокупные выбросы CO_2 в значительной мере определяют повышение средней глобальной приземной температуры к концу XXI века и в дальнейшем. Большинство аспектов изменения климата будут отмечаться в течение многих столетий, даже если выбросы CO_2 прекратятся.

Короткоживущие климатические загрязнители

История объединенных международных усилий по противоборству современным изменениям климата коротка. На смену начавшему действовать в январе 2008 г. и по сути утратившему свое значение к началу 2013 г. Киотскому протоколу пришло подписанное в декабре 2015 г. Парижское соглашение. Попытка заполнить образовавшуюся таким образом трехлетнюю паузу 2013–2015 гг. была предпринята в 2012 г. С этой целью была создана Коалиция, объявившая своей целью реализацию идеи сокращения выбросов газов и аэрозолей, чье воздействие на радиационный режим и на климат значительно, но время пребывания в атмосфере существенно короче (недели, месяцы или годы),

чем у долгоживущих CO_2 и N_2O. В число таких субстанций, названных Короткоживущими Климатическими Загрязнителями (ККЗ)[43], вошли: метан, большая группа гидрофторуглеродов, сажесодержащие и рассеивающие аэрозоли. Причём наиболее перспективными считались усилия, направленные на сокращение эмиссии метана и черного углерода. Предполагалось, что благодаря заявленным Коалицией мерам, рост приземной температуры воздуха с настоящего времени не превзойдет 0,5 ^oC в 2050 г.[44] Сегодня считается, что сокращение эмиссии ККЗ станет не альтернативой, а дополнением мер, которые предстоит осуществить в рамках Парижского соглашения.[45]

По современным оценкам, суммарный вклад ККЗ в глобальное антропогенное радиационное воздействие составляет около 40 %.[46] Однако известно, что радиационное воздействие недостаточно пригодно для характеристики влияния короткоживущих компонентов атмосферного воздуха на климатическую систему Земли. Поэтому наряду с ним используются другие климатические индексы, в частности, Потенциал Глобального Потепления (ПГП, Global Warming Potential, GWP). ПГП показывает, во сколько раз вклад единичной массы рассматриваемой субстанции в глобальное потепление превосходит аналогичный вклад единичной массы CO_2. В зависимости от целей исследования используют три расчетных значения ПГП, соответствующие временным промежуткам 20 (табл. 1.1), 100 и 500 лет.

Таблица 1.1. Значения ПГП для 20-летнего интервала – для основных ККЗ[47]

ККЗ	Время жизни (годы)	ПГП
Углекислый газ	~100	1
Метан	10–12	72
Черный углерод	<<1: несколько дней или недель	3200

Очевидно, что ККЗ, как метан, так и черный углерод, значительно эффективнее, чем CO_2, способствуют глобальному потеплению (табл. 1.1). Тем не менее, поскольку современная атмосферная концентрация CO_2 превосходит

[43] в оригинале: Short-Lived Climate Pollutants, SLCPs

[44] Кароль И.Л., А.А. Киселев, Е.Л. Генихович, С.С. Чичерин, 2013: Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 49. № 5. С. 503–522.

[45] Shindell D., N. Borgford-Parnell, M. Brauer, A. Haines, J.C.I. Kuylenstierna, S.A. Leonard, V. Ramanathan, A. Ravishankara, M. Amann, L. Srivastava, 2017: A climate policy pathway for near- and long-term benefits. *Science*, v. 356, Issue 6337, pp. 493–494.

[46] https://www.arb.ca.gov/cc/shortlived/meetings/03142017/final_slcp_report.pdf

[47] https://www.arb.ca.gov/cc/shortlived/meetings/03142017/final_slcp_report.pdf

концентрации этих ККЗ, как минимум, на два порядка, двуокись углерода сегодня остается основным газом среди ответственных за антропогенные изменения климата.

Метан

В некотором смысле метан – связующий «мостик» между вышеупомянутой Коалицией и Парижским соглашением, поскольку в обоих документах ему отводится важная роль. Основная часть атмосферного метана (CH_4) имеет биогенное бактериальное происхождение. Атмосферные источники CH_4 отсутствуют, и поступление метана в атмосферу полностью обеспечивается его потоками с земной поверхности. Все источники метана условно делятся на две большие группы: естественные и антропогенные. Наиболее важные естественные источники связаны с потоками CH_4 с поверхности заболоченных территорий, пресноводных водоемов, океанической поверхности, а также с метаном, образующимся в колониях термитов и выделяемым при сжигании огромных объемов биомассы в результате пожаров. С антропогенной деятельностью связаны потоки метана в атмосферу при добыче ископаемого топлива, захоронении мусора на свалках, сжигании бытовых отходов, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий, разведении крупного рогатого скота и др. По недавним оценкам, интенсивность глобальных естественных и антропогенных выбросов метана приблизительно одинакова – 347 и 331 Мт/год, соответственно[48]. При этом около 2/3 естественных выбросов приходится на потоки CH_4 с переувлажненных территорий, а антропогенные источники формируются главным образом при добыче ископаемого топлива, в животноводстве и при землепользовании и утилизации мусора, около 29, 27 и 23 %, соответственно. На страны арктического региона приходится примерно пятая часть общемировой эмиссии метана. Основными составляющими эмиссии CH_4 с территории России являются поток с поверхности переувлажненных территорий (около 50 %) и выход из газо- и нефтедобывающих скважин и угольных шахт (около 30–40 %). При этом преобладающая часть как

[48] Kirschke S., P. Bousquet, P. Ciais, M. Saunois, J.G. Canadell, E.J. Dlugokencky, P. Bergamaschi, D. Bergmann, D.R. Blake, L. Bruhwiler, P. Cameron-Smith, S. Castaldi, F. Chevallier, L. Feng, A. Fraser, M. Heimann, E.L. Hodson, S. Houweling., B. Josse, P.J. Fraser, P.B. Krummel, J. Lamarque, R.L. Langenfelds, C. Le Quéré, V. Naik, S. O'Doherty, P.I. Palmer, I. Pison, D. Plummer, B. Poulter, R.G. Prinn, M. Rigby, B. Ringeval, M. Santini, M. Schmidt, D.T. Shindell , I.J. Simpson, R. Spahni, L.P. Steele, S.A. Strode, K. Sudo, S. Szopa, G.R. van der Werf, A. Voulgarakis, M. van Weele, R.F. Weiss, J.E. Williams, G. Zeng, 2013: Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6, pp. 813-823, doi: 10.1038/ngeo1955.

переувлажнённых территорий, так и газо- и нефтеносных месторождений России расположена именно в арктическом регионе. Оценки российской антропогенной составляющей свидетельствуют о том, что основной вклад в неё вносит энергетический сектор экономики, главным образом, вследствие технологических выбросов и утечек[49] (табл. 1.2 и рис. 1.5).

Таблица 1.2. Выбросы метана в различных секторах хозяйства Российской Федерации в разные годы (в Мт/год)[50]

Категории источников	Год				
	1990	2000	2005	2010	2014
Энергетика					
Сжигание топлива	0,55	0,14	0,15	0,15	0,14
Технологические выбросы и утечки	29,6	20,0	26,4	28,0	28,8
Промышленность					
Химическая промышленность	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
Металлургия	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Сельское хозяйство					
Внутренняя ферментация сельскохозяйственных животных	5,04	2,32	2,08	1,96	2,00
Системы сбора, хранения и использования навоза и помета	0,50	0,21	0,20	0,21	0,22
Выращивание риса	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Лесные пожары	0,48	0,47	0,46	0,50	0,57
Отходы производства и потребления					
Захоронение твердых отходов в земле	1,89	2,18	2,39	2,78	3,24
Очистка промышленных сточных вод	0,80	0,81	0,81	0,80	0,84
Очистка коммунально-бытовых сточных вод	0,29	0,15	0,26	0,25	0,29
Сумма	**39,19**	**26,32**	**32,80**	**34,70**	**36,15**

[49] Expert Group on Black Carbon and Methane Summary of Progress and Recommendations. Arctic Council. 2017, 47 pp. https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/1936

[50] Национальный Доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2014 гг. Часть 1. Москва, 2016, 476 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/RUS-NIR-2016_vol1.pdf. Представленные в табл. 1.2 оценки заметно превосходят аналогичные оценки из «Шестого Национального Сообщения Российской Федерации, представленного в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола» (М., 2013, 202 с., http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/6nc_rus_final.pdf) (см. Киселев А.А., И.Л.Кароль , 2015: Еще раз про метан // *Природа*. № 11, С. 9–17). Это связано с различием в методике типовых расчётов антропогенной эмиссии метана в указанных документах.

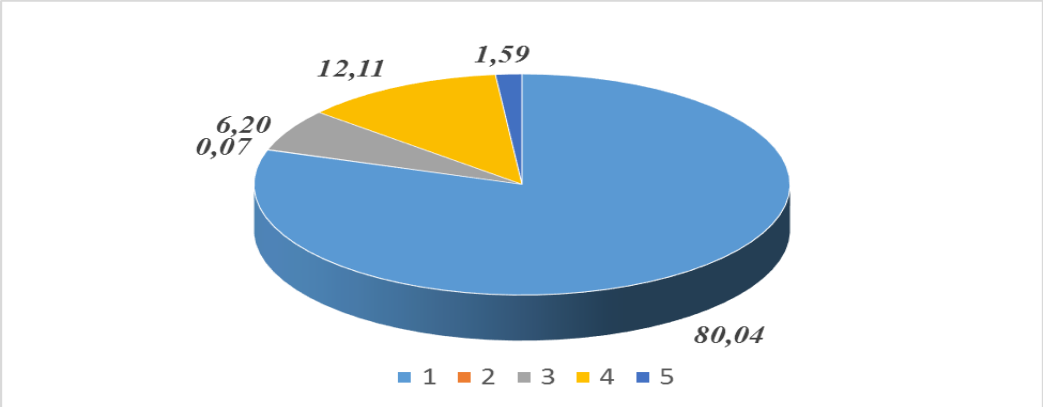

Рис. 1.5. Вклад производственных отраслей Российской Федерации в эмиссию метана (%): 1 – энергетика; 2 – промышленность; 3 – сельское хозяйство; 4 – отходы; 5 – пожары.

В последние десятилетия также появились новые источники метана, обусловленные потеплением региона. К таковым относятся несколько возможных путей поступления метана в атмосферу, а именно: а) выделение метана, захороненного в слое многолетней мерзлоты, при увеличении периода и глубины ее протаивания; б) высвобождение газообразного метана из газогидратов, большие залежи которых обнаружены на шельфах морей Лаптевых, Чукотского и др.; в) перенос растворенного метана в моря Северного Ледовитого океана крупнейшими реками Восточной Сибири. Пока вклад таких источников невелик даже в глобальном масштабе (0–1 и 2–9 Мт/год из мерзлоты и гидратов, соответственно[51]).

Разрушение большинства (~90 %) молекул метана в атмосфере происходит в его химической реакции с гидроксильным радикалом[52]. Неподлежащие антропогенному контролю невысокая интенсивность этой реакции и низкая концентрация OH-радикалов в атмосфере способствуют достаточно длительному нахождению там молекул CH_4. Поэтому основным способом снижения содержания метана в атмосфере остаётся сокращение его эмиссии.

[51] Kirschke S., P. Bousquet, P. Ciais, M. Saunois, J.G. Canadell, E.J. Dlugokencky, P. Bergamaschi, D. Bergmann, D.R. Blake, L. Bruhwiler, P. Cameron-Smith, S. Castaldi, F. Chevallier, L. Feng, A. Fraser, M. Heimann, E.L. Hodson, S. Houweling., B. Josse, P.J. Fraser, P.B. Krummel, J. Lamarque, R.L. Langenfelds, C. Le Quéré, V. Naik, S. O'Doherty, P.I. Palmer, I. Pison, D. Plummer, B. Poulter, R.G. Prinn, M. Rigby, B. Ringeval, M. Santini, M. Schmidt, D.T. Shindell , I.J. Simpson, R. Spahni, L.P. Steele, S.A. Strode, K. Sudo, S. Szopa, G.R. van der Werf, A. Voulgarakis, M. van Weele, R.F. Weiss, J.E. Williams, G. Zeng, 2013: Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6, pp. 813–823, doi: 10.1038/ngeo1955.

[52] Киселев А.А., Решетников А.И., 2013: Метан в российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // *Проблемы Арктики и Антарктики.* № 2. С. 5–15.

Вследствие продолжительного времени пребывания молекул метана в атмосфере, его концентрация горизонтально почти однородна, а вследствие высокого значения его ПГП, радиационное воздействие CH_4 (0,48 Вт/м^2) оценивается как второе по величине после радиационного воздействия CO_2 (1,66 Вт/м^2). Поэтому регулирование содержания метана в атмосфере является потенциально наиболее эффективным способом борьбы с современным глобальным потеплением. Недавно были обнародованы модельные оценки, как изменится приземная температура при сокращении антропогенных выбросов метана всеми странами арктического региона. Предполагалось, что к 2030 г. такое сокращение составит 51 % относительно выброса 2005 г. В этом случае снижение приземной температуры составило 0,07–0,18^{o}C в среднем по земному шару и 0,26–0,40 ^{o}C в Арктике[53].

Черный углерод

Черный углерод входит в состав аэрозолей горения и является продуктом неполного сгорания ископаемых топлив и биомассы. Оценки говорят о том, что современные выбросы черного углерода в 3–6 раз превосходит его выбросы в доиндустриальный период. Сегодня вклад от сжигания природных ископаемых топлив в индустриальных установках и отопительных системах, от сжигания дизельного топлива в транспортных системах, от горения биомассы при лесных пожарах и при сжигании биотоплива для отопления домов и приготовления пищи составляет примерно 25 % от всей эмиссии аэрозолей с поверхности Земли. Доля различных источников в общем выбросе черного углерода в атмосферу такова: 42 % приходится на открытое сжигание биомассы, 24 % – на отопление и приготовление пищи, также 24 % привносит транспорт, и за оставшиеся 10 % ответственны индустриальные установки (при этом отмечается наличие больших региональных различий)[54]. Оценка антропогенного радиационного воздействия существенно разнится у разных авторов от 0,2–0,6 Вт/м^2 до 0,9 Вт/м^2 и 1,0 Вт/м^2 [55] и даже 1,1 ± 0,9 Вт/м^2.[56]

---

[53] AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer (http://www.amap.no/documents/doc/AMAP-Assessment-2015-Methane-as-an-Arctic-climate-forcer/1285).

[54] Baron R.E., W.D. Montgomery, S.D. Tuladhar, 2010: An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change. Copenhagen consensus on climate. 31 p. (AP_Black_Carbon_Baron_Montgomery_Tuladhar_v.4.0.pdf).

[55] Кароль И.Л., А.А. Киселев, Е.Л. Генихович, С.С. Чичерин, 2013: Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 49. №5. С. 503–522.

[56] Bond T.C., S.J. Doherty, D.W. Fahey, P.M. Forster, T. Berntsen, B.J. DeAngelo, M.G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P.K. Quinn, M.C. Sarofim, M.G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S.K. Guttikunda, P.K. Hopke, M.Z. Jacobson, J.W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J.P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S.G. Warren, C.S. Zender,

Наиболее чувствительным к увеличению выбросов черного углерода регионом северного полушария является Арктика. Существует несколько механизмов воздействия сажи на климат: а) в воздухе сажа поглощает солнечную энергию и излучает инфракрасную (тепловую) радиацию; б) после выпадения на земную поверхность она увеличивает количество поглощенной солнечной энергии покрытой снегом и льдом поверхностью (увеличивает альбедо поверхности); в) сажа способствует накоплению ядер конденсации в облаках и, как следствие, изменениям фазовых переходов в них.

Согласно модельным оценкам, наибольший вклад в загрязнение Арктики черным углеродом вносит Южная Азия, около 29 % (относительно мировой эмиссии углесодержащих аэрозолей). Российская эмиссия, формирующаяся в основном пожарами сибирских лесов, а также сжиганием биотоплива (дров), в три раза меньше европейской, однако их вклады в загрязнение Арктики примерно одинаковы (10-15 % каждый), это объясняется близостью нашей страны к северной полярной области Земли. В то же время антропогенная эмиссия и горение тропических биомасс в Южной Азии оказывают более существенное влияние на появление «арктической дымки» по сравнению с Россией, Европой и Северной Америкой.

Вклад черного углерода в разогрев приземного воздуха для северной полярной области (около 50 %), примерно, вдвое больше, чем для всего земного шара (около 25 %) (рис. 1.6).

В табл. 1.3 приведены два сценария выбросов черного углерода до 2030 г. в крупных регионах Земли. Первый из них соответствует сохранению существующих сегодня тенденций, а второй – оптимистический – значительному последовательному сокращению его эмиссии, начиная с 1995 г. Основной упор делается на сокращении эмиссии в азиатском регионе, который на сегодняшний день является мировым лидером по загрязнениям черным углеродом.

2013: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research*. V. 118, №. 11, pp. 5380-5552, doi: 10.1002/jgrd.50171.

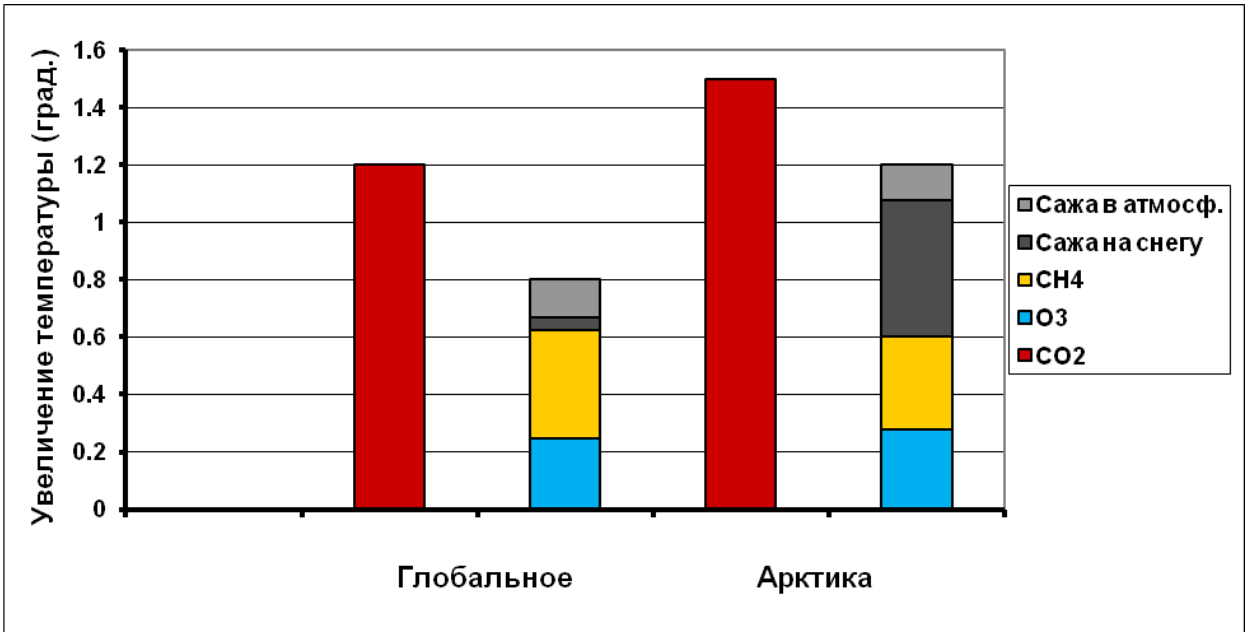

Рис. 1.6. Современное увеличение температуры приземного воздуха (°C) относительно доиндустриального периода, обусловленное изменениями содержания CO_2 и короткоживущих климатических загрязнителей в глобальном масштабе и отдельно в Арктике.[57]

Таблица 1.3. Уровень эмиссии черного углерода по двум сценариям, кт/год[58]

Черный углерод	Уровень эмиссии					Максимально возможное сокращение		
Регион	**1990**	**2000**	**2010**	**2020**	**2030**	**2010**	**2020**	**2030**
Северная Америка	0,32	0,28	0,24	0,19	0,18	0,08	0,09	0,09
Западная Европа	0,41	0,39	0,27	0,21	0,18	0,24	0,16	0,12
Южная Корея, Япония	0,09	0,09	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02
Центральная и Восточная Европа	0,13	0,10	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03	0,02
Россия и СНГ	0,54	0,21	0,26	0,25	0,27	0,12	0,11	0,12
Центральная равнинная Азия	2,03	2,18	2,43	2,16	1,88	1,70	1,49	1,26
Остальная Тихоокеанская Азия	0,32	0,37	0,36	0,31	0,34	0,25	0,21	0,24
Южная Азия	0,74	0,77	0,73	0,67	0,67	0,51	0,45	0,43
Латинская Америка	0,50	0,41	0,35	0,28	0,22	0,20	0,15	0,08
Средний Восток	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01
Африка	0,35	0,50	0,57	0,61	0,53	0,48	0,50	0,39
Весь мир в целом	5,48	5,34	5,38	4,82	4,41	3,65	3,23	2,78

[57] Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по Изменению климата / Ред. Р.К. Пачаури, А. Райзингер и др. Женева, 2007.

[58] Baron R.E., W.D. Montgomery, S.D. Tuladhar, 2010: An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change. Copenhagen consensus on climate. 31 p. (AP_Black_Carbon_Baron_Montgomery_Tuladhar_v.4.0.pdf).

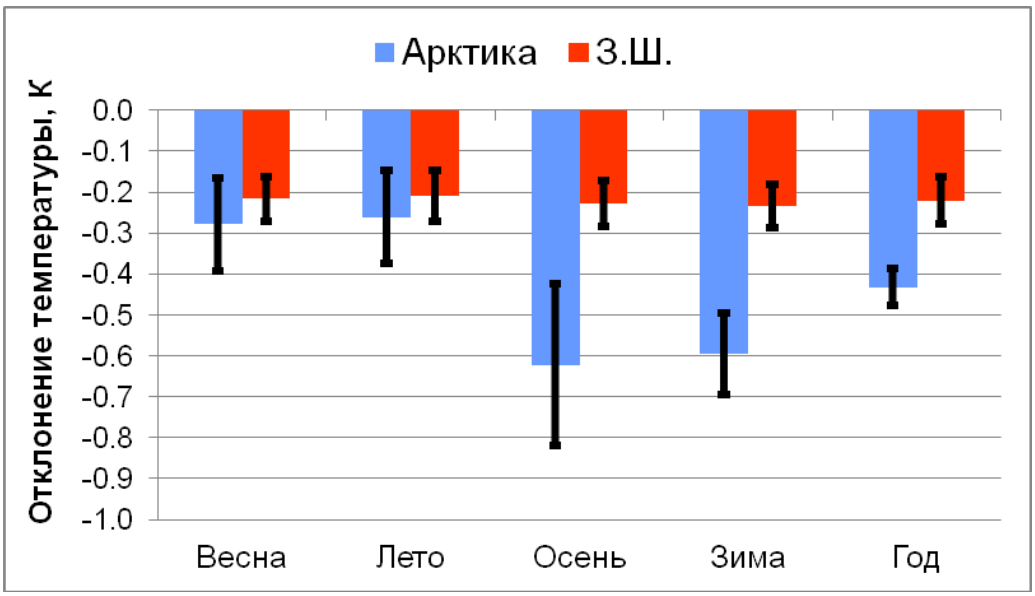

Рис. 1.7. Сезонные и среднегодовые отклонения температуры (°C) для Арктики и всего земного шара (З.Ш.) в период 2041-2050 гг., расчитанные и осредненные по результатам четырех моделей. «Усы» показывают стандартные отклонения индивидуальных модельных результатов.[59]

Полученные по результатам четырех климатических моделей оценки отклика приземной температуры воздуха в течение одного десятилетия (2041-2050 гг.) при условии существенного (и едва ли достижимого на практике) эволюционного сокращения антропогенной эмиссии метана и черного углерода (на 50 и 80% относительно современного уровня, соответственно) показали снижение в среднем за год приземной температуры на 0,22 °C для всего земного шара и на 0,44 °C для Арктики (рис. 1.7). При этом если в глобальном масштабе сезонный ход в отклонениях температуры практически отсутствует, то для Арктики наибольший отклик температуры имеет место в холодный, осенне-зимний период. Важно отметить, что основной вклад вносит метан, ответственный за 78 % этого отклика, в то время как на все более короткоживущие загрязнители, в первую очередь, на черный углерод, приходится лишь 22 %.

Время пребывания сажевых частиц в атмосфере исчисляется несколькими днями и лишь изредка неделями. Вследствие этого, их наибольшие концентрации наблюдаются вблизи источников, а содержание черного углерода на удалении от

[59] Stohl A., B. Aamaas, M. Amann, L.H. Baker, N. Bellouin, T.K. Berntsen, O. Boucher, R. Cherian, W. Collins, N. Daskalakis, M. Dusinska, S. Eckhardt, J.S. Fuglestvedt, M. Harju, C. Heyes, Ø. Hodnebrog, J. Hao, U. Im, M. Kanakidou, Z. Klimont, K. Kupiainen, K.S. Law, M.T. Lund, R. Maas, C.R. MacIntosh, G. Myhre, S. Myriokefalitakis, D. Olivié, J. Quaas, B. Quennehen, J.-C. Raut, S.T. Rumbold, B.H. Samset, M. Schulz, Ø. Seland, K.P. Shine, R.B. Skeie, S. Wang, K.E. Yttri, T. Zhu, 2015: Evaluating the climate and air quality impacts of short-lived pollutants. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, pp. 10529–10566. doi:10.5194/acp-15-10529-2015.

них во многом зависит от метеорологической обстановки, главным образом, от наличия и интенсивности осадков. В целом эффект черного углерода может носить лишь региональный характер, поскольку область его распространения за время пребывания в атмосфере ограничена[60]. В то же время наличие черного углерода в воздухе негативно сказывается на здоровье человека, прежде всего провоцирует болезни органов дыхания и связанные с ними нарушения в работе сердечно-сосудистой системы.

В целом относительно небольшое время пребывания ККЗ в атмосфере, а также разнородность источников метана создают значительные трудности для инвентаризации источников ККЗ, а как следствие, для получения качественных модельных оценок. Поэтому необходимо отметить, что современные оценки нуждаются в дальнейшем совершенствовании, и относиться к ним нужно с известной осторожностью.

Оценки изменений климата Арктики в XXI веке, полученные с помощью глобальных климатических моделей[61]

Термический режим

Зимой наибольшее потепление захватывает акваторию Северного Ледовитого океана (рис. 1.8 и 1.9). К середине XXI века наибольшее потепление приходится на Баренцево и Чукотское моря (в среднем по ансамблю для сценария RCP8.5 – свыше 10 ºС), а также, в меньшей степени, на Гудзонов залив. Очевидно, это связано с сокращением площади морского льда. В значительной части моделей наибольшее потепление достигается в центральной Арктике не зимой, а осенью, когда приземная температура воздуха сильно реагирует на

[60] Кароль И.Л., А.А. Киселев, 2012: Радиационные и температурные индексы короткоживущих атмосферных «движителей» текущего изменения климата // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 567. С. 284–291.

[61] Раздел базируется на следующих публикациях авторов: Катцов, В.М., Т.В. Павлова, 2015: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) //*Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 579. С.7–21; Павлова Т.В., В. М. Катцов, 2015: Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 579. С. 22–36; Катцов, В.М., В.А. Говоркова, 2013: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и среднегодового стока на территории России: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5). *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 569. С. 76–98; Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П.В., Говоркова В. А., 2013: Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 569. С. 38–61; Павлова Т.В., В.М. Катцов, 2013: Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 568. С. 7–25.

уменьшение (по отношению к современному климату) площади ледяного покрова и толщины морского льда (рисунок не приводится). К концу XXI века сильное потепление зимой (в среднем по ансамблю для сценария RCP8.5 – свыше 20 ºС) охватывает всю акваторию Северного Ледовитого океана. Для сценария RCP2.6, дающего наименьшее потепление Арктики, различия изменений приземной температуры воздуха между серединой и концом XXI века невелики.

Летом потепление на большей части акватории Северного Ледовитого океана остается в пределах 1 ºС к середине и 2ºС к концу XXI века (за исключением сценария RCP8.5, для которого повышение температуры в центральной Арктике достигает 3 ºС), поскольку приземная температура воздуха удерживается у точки замерзания воды благодаря присутствию тающего льда (рис. 1.8 и 1.9). Контраст между зимним и летним потеплением распространяется и на окружающую Северный Ледовитый океан сушу, однако там он не столь ярко выражен.

Гидрологический режим

Рост осадков ожидается на протяжении всего XXI века на фоне интенсивной межгодовой изменчивости и увеличивающегося разброса между моделями. Доля осадков, выпадающих в виде дождя, будет увеличиваться с потеплением климата. Северный Ледовитый океан и окружающая его суша характеризуются наибольшим относительным увеличением осадков (рис. 1.10 и 1.11). Общее увеличение осадков в высоких широтах при глобальном потеплении – хорошо исследованный результат практически любых модельных расчетов реакции климатической системы на рост содержания парниковых газов в атмосфере. При этом наибольшее увеличение осадков, как правило, отмечается в моделях, демонстрирующих наибольшее потепление, как полярное, так и глобальное.

В отличие от акватории Северного Ледовитого океана, осадки над водосборами впадающих в него рек возрастают не во все сезоны. Например, результаты расчетов примерно половины моделей для сценария RCP8.5 указывают на уменьшение летних осадков в бассейне Оби к концу XXI века.

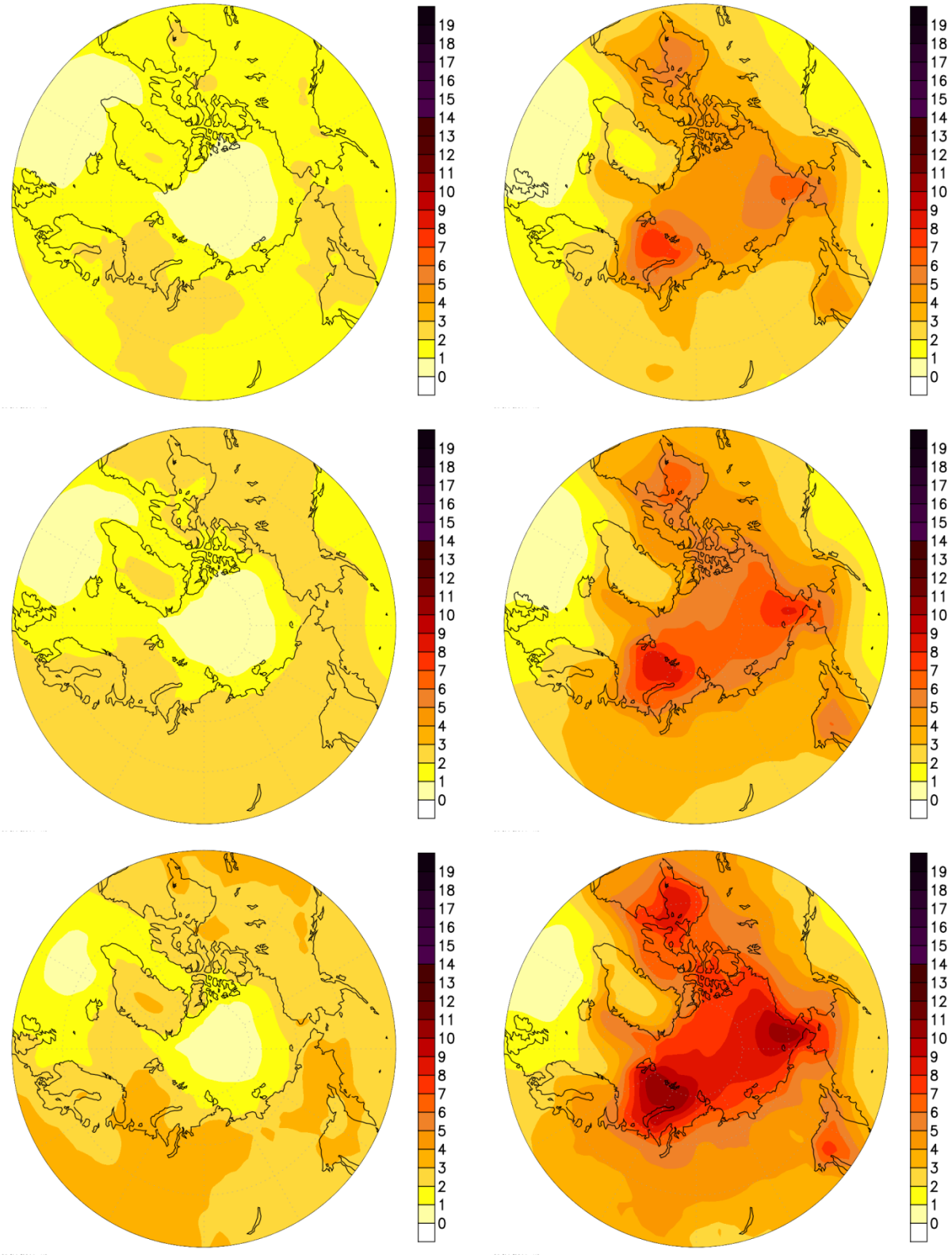

Рис. 1.8. Изменения приземной температуры воздуха (°C) в моделях CMIP5 в северной полярной области к 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг. для сценариев RCP2.6 (23 модели, вверху), RCP4.5 (31 модель, в середине), RCP8.5 (31 модель, внизу): справа – декабрь-январь-февраль; слева – июнь-июль-август.

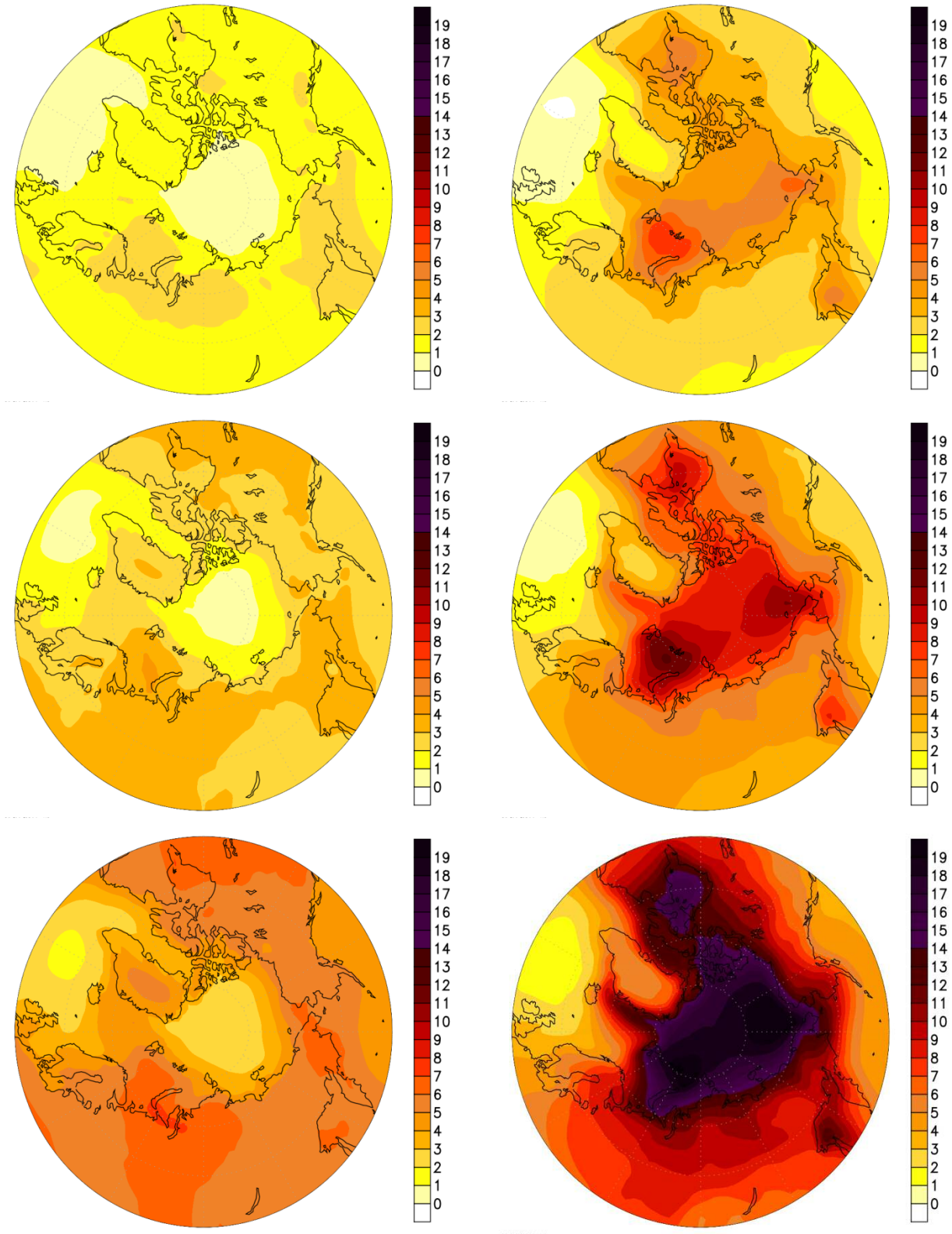

Рис. 1.9. То же, что рис.1.8, но для периода 2080–2099 гг.

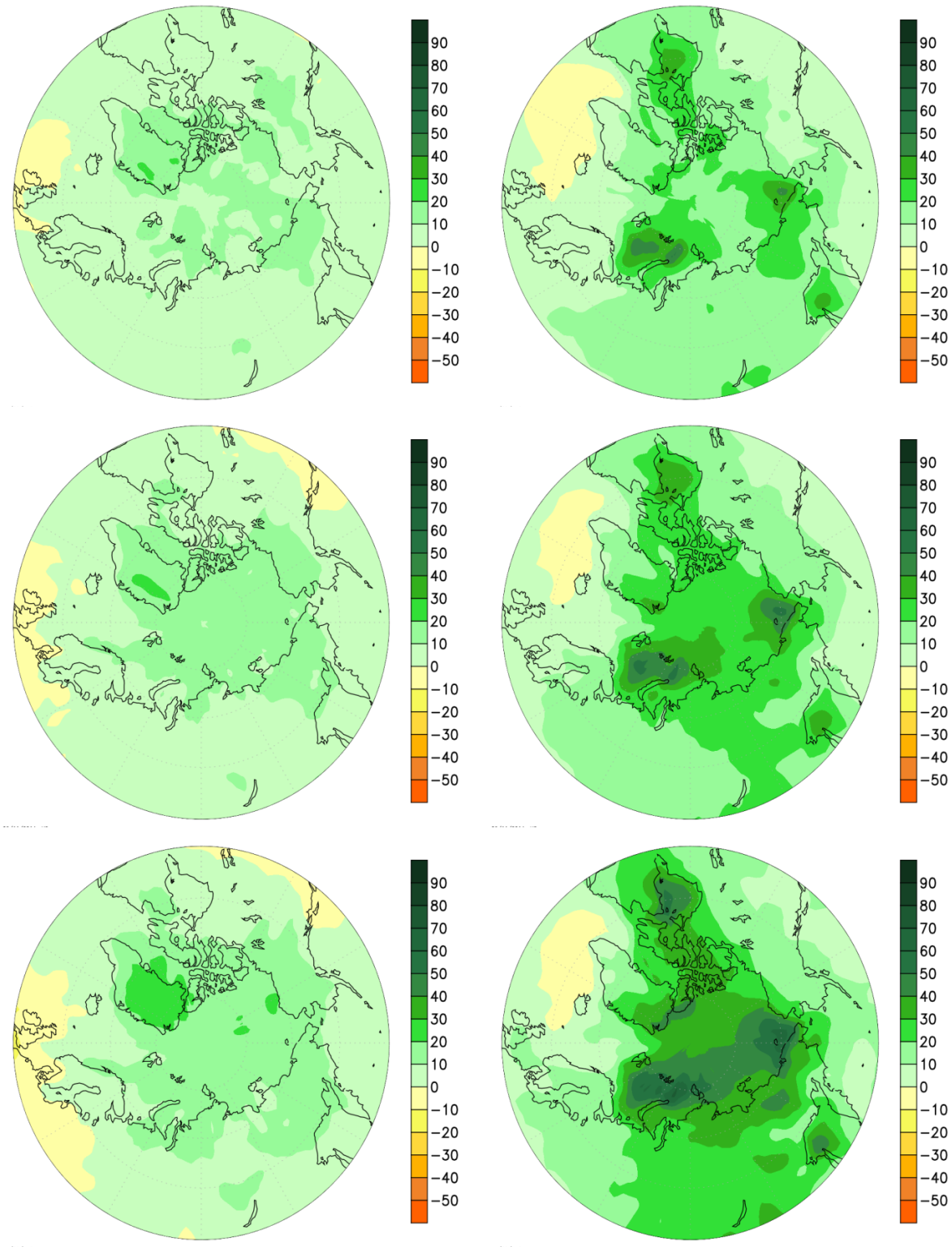

Рис. 1.10. Изменения суммарных осадков (%) в моделях CMIP5 в северной полярной области к 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг. для сценариев RCP2.6 (23 модели, вверху), RCP4.5 (31 модель, в середине), RCP8.5 (31 модель, внизу): справа – декабрь–январь–февраль; слева – июнь–июль–август.

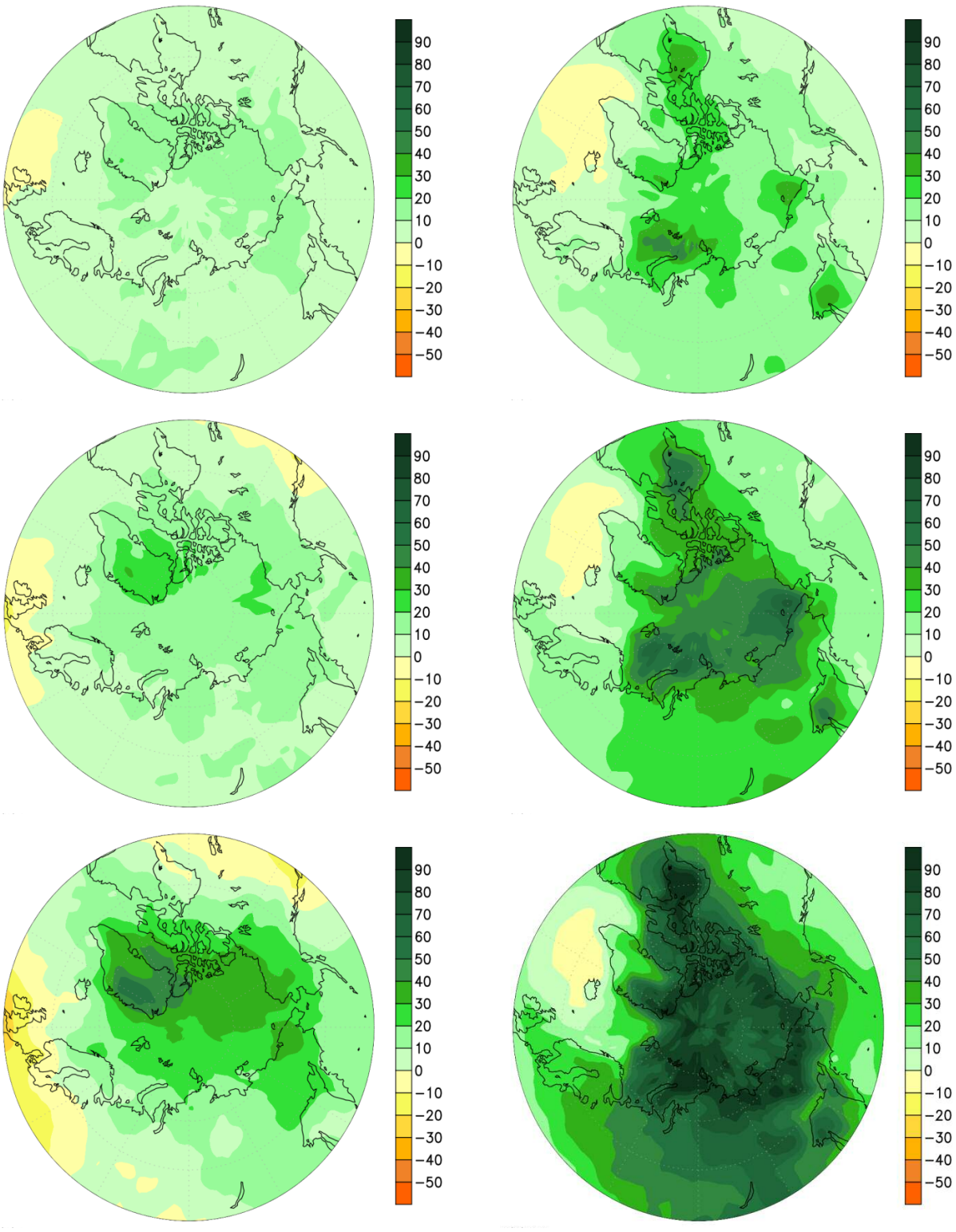

Рис. 1.11. То же, что рис.1.10, но для периода 2080–2099 гг.

Среднегодовые значения разности осадков и испарения (P – E) над водосборами рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, и, соответственно, речного стока в океан возрастают при всех сценариях. Наиболее значительное увеличение стока ожидается для Лены (38 % к концу XXI века для сценария RCP8.5); наименьшее (для «жесткого» сценария RCP8.5) – для Оби: 13 %. Общее увеличение притока пресной воды в Северный Ледовитый океан за счет водосборов суши составляет от 9 % (RCP2.6) до 28 % (RCP8.5). Изменения P – E собственно над акваторией Северного Ледовитого океана (в пределах 70 ºс. ш.) составляют от 6 % (RCP2.6) до почти 25 % (RCP8.5).

Снежный покров суши и многолетняя мерзлота

Расчеты будущих изменений снежного покрова указывают на сокращение его площади с различной скоростью в зависимости от рассматриваемого сценария. Так, при реализации сценария RCP4.5 сокращение площади снега к концу XXI века составит для среднегодовой площади 16 ± 5 % по отношению к среднегодовой площади снега за период 1980–1999 гг., при реализации сценария RCP8.5 среднегодовая площадь снега сократится на 30 ± 7 %. Изменения площади снега в марте составят 12 ± 4 % и 24 ± 5 %, площади снега в апреле – 17 ± 7 % и 31 ± 8 % для сценариев RCP4.5 и RCP8.5, соответственно.

Рост осадков, связанный с потеплением глобального климата, будет приводить к тому, что зимой в холодных регионах, где осадки выпадают в основном в виде снега, снегонакопление будет увеличиваться. Как видно из модельных расчетов, на водосборе Лены и в меньшей степени на водосборе Енисея с конца XX века значительно увеличивается масса тающего снега, что способствует возникновению высоких паводков и увеличению риска наводнений. Этого не происходит на водосборе Оби.

Снежный покров (площадь его распространения, высота, продолжительность залегания) оказывает существенное влияние на температурный режим многолетнемерзлых грунтов (рис. 1.12).

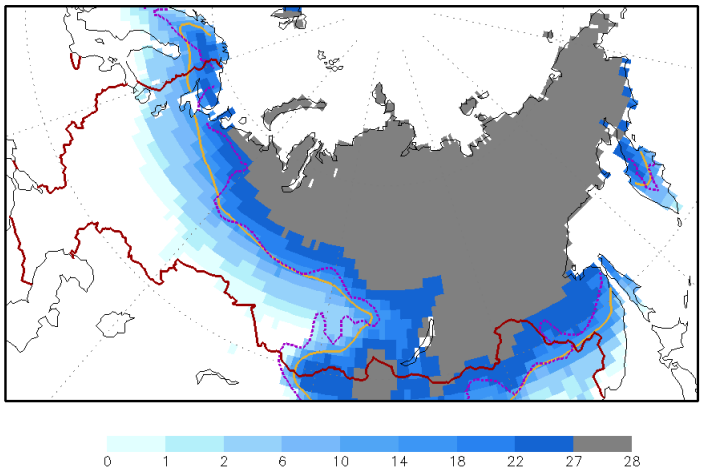

Рис. 1.12. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы по данным расчетов на базе 28 моделей CMIP5 для периода 1980–1999 гг. В каждой ячейке сетки 1° × 1° различными оттенками синего цвета показано количество моделей, в оценках которых для этой ячейки осредненная за период 1980-1999 гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3,3 м не превышает 0°С. Темно-желтая линия показывает условную расчетную границу зоны многолетней мерзлоты, определяемую по положению среднегодовой изотермы 0°С на глубине 3,3 м, осредненной по ансамблю моделей, фиолетовая линия – современная наблюдаемая граница многолетней мерзлоты[62]. Расчеты выполнены с помощью модели теплопереноса в грунтах, разработанной в ГГО. Для вычисления термического состояния грунтов в качестве граничных условий на поверхности в модели были использованы данные о температуре и высоте снега, полученные в расчетах с моделями CMIP5. В качестве условной границы многолетней мерзлоты рассматривается положение нулевой изотермы среднегодовой температуры грунта на модельном уровне 3,3 м. Положение средней по ансамблю расчетов нулевой изотермы среднегодовой температуры грунта на глубине 3,3 м удовлетворительно описывает современную границу многолетней мерзлоты, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты. Площадь, занятая многолетней мерзлотой в Северном полушарии (без учета Гренландии), составила 21,9 млн км^2 в расчетах с данными моделей CMIP5, что практически совпадает с результатами, полученными с использованием данных CMIP3 (21,8 млн км^2). Фактическая площадь этой зоны по современным оценкам 22,8 млн км^2.

Положение условной границы зоны многолетней мерзлоты для середины и конца XXI века зависит от выбранного сценария (рис. 1.13). Расчеты показывают,

[62] Brown, J., O.J. Ferrians, J.A. Heginbottom,and E.S. Melnikov, 1997: International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. *U.S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series*, Map CP-45. Scale 1:10,000,000; Brown, J., O.J. Ferrians, J.A. Heginbottom, and E.S. Melnikov, 1998: Digital circum-arctic map of permafrost and groundice conditions. In *Circumpolar Active-Layer Permafrost System (CAPS) CD-ROM*, version 1.0. National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder.

что для середины века общая картина изменения границ зоны многолетней мерзлоты при реализации сценария RCP8.5 не сильно отличается от варианта расчетов для сценария RCP4.5.

Совершенно иная картина обнаруживается к концу XXI века. В случае реализации сценария RCP8.5 граница зоны значительно смещается к северу; более того, практически не остается таких ячеек модельной сетки, в которых мерзлота была бы получена во всех моделях (исключение – часть Канадского архипелага).

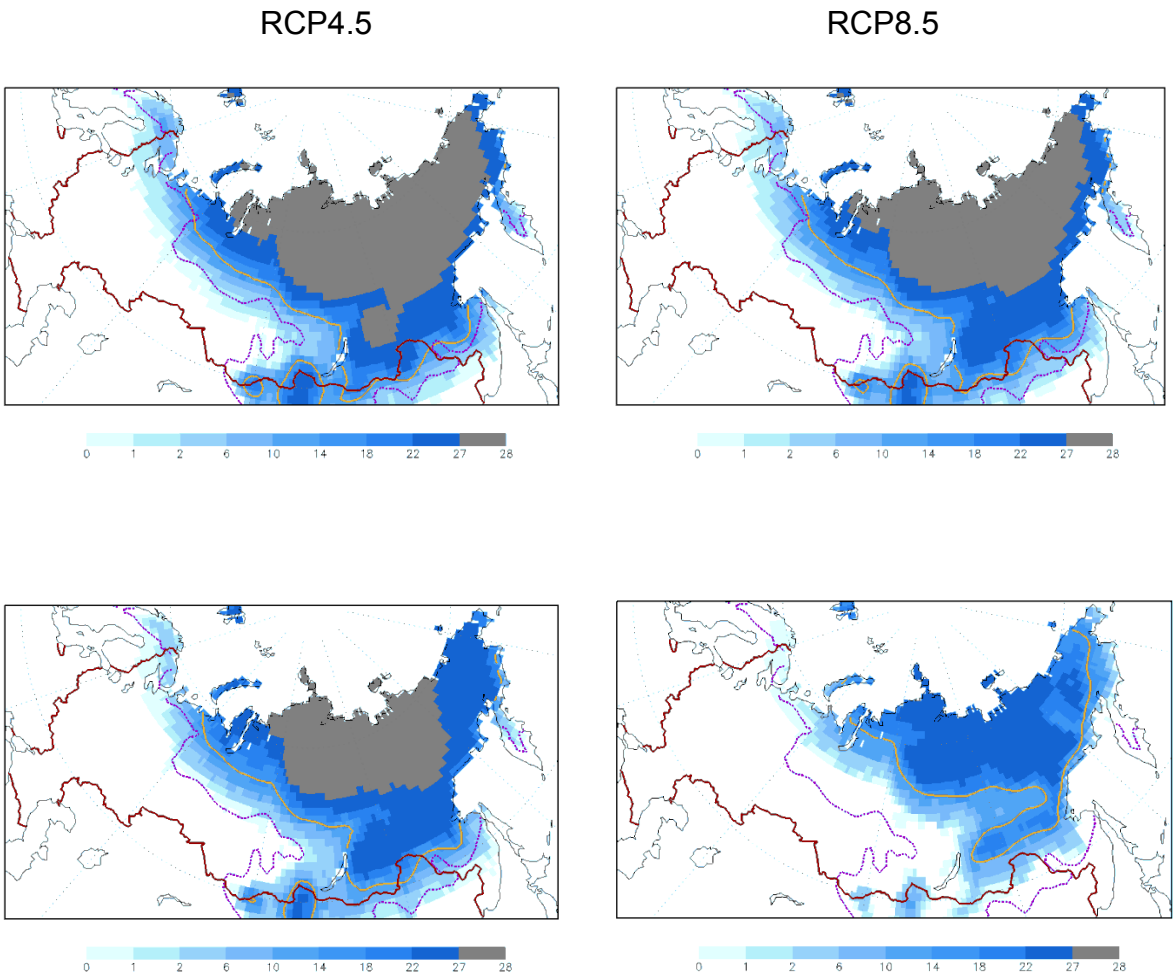

Рис. 1.13. То же, что рис. 1.12, но для середины (вверху) и конца (внизу) XXI века по данным расчетов на базе 28 МОЦАО по двум сценариям RCP4.5 (слева) и RCP8.5 (справа).

В среднем по ансамблю площадь, занятая многолетней мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы (рис. 1.14), сократится к середине XXI века по сравнению с концом XX века на 24 ± 7 % при сценарии RCP4.5 и на 30 ± 8 % при сценарии RCP8.5, в конце XXI века сокращение составит 34 ± 11 % и 60 ± 14 % для сценариев RCP4.5 и RCP8.5, соответственно.

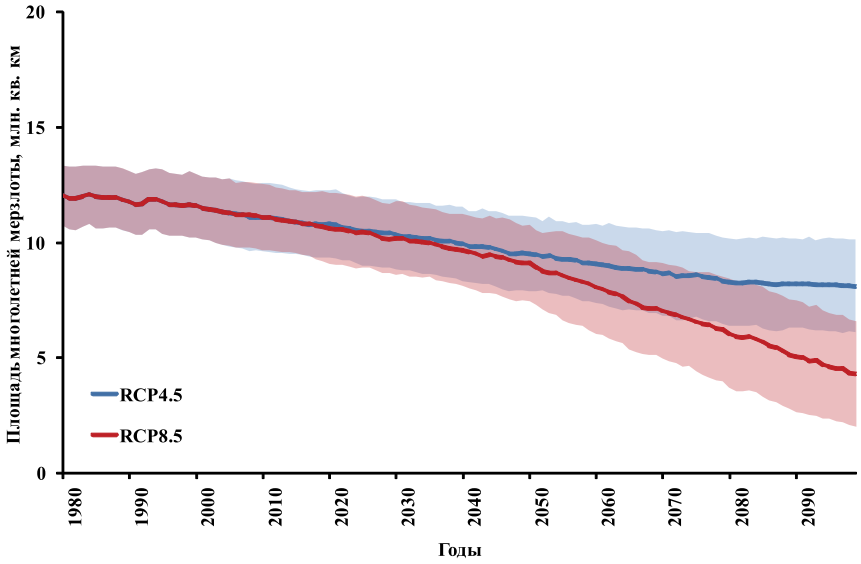

Рис. 1.14. Эволюция площади приповерхностной многолетней мерзлоты на территории России в 1980–2099 гг по расчетам на основе 28 глобальных климатических моделей (сценарии RCP4.5 и RCP8.5). Синяя и красная линии – среднее по ансамблю из 28 расчетов. Цветные области – межмодельный разброс (±1 с.к.о.)

Расчеты почвенно-мерзлотного индекса для конца XXI века показывают, что при реализации сценария RCP4.5 сохранение приповерхностной мерзлоты в границах современной зоны прерывистой многолетней мерзлоты маловероятно, а при реализации сценария RCP8.5 условия, благоприятные для существования приповерхностной многолетней мерзлоты, сохранятся только на территории Канадского архипелага, российской Арктики и Восточно-Сибирского нагорья[63].

Морской лед

Предыдущие поколения климатических моделей (например, CMIP3[64]) однозначно указывали на сокращение площади морского льда в Арктике на протяжении XXI века. Интенсивность сокращения площади льда зависела от сценария радиационного воздействия, причем разброс количественных оценок

[63] Slater, A.G., and D.M. Lawrence, 2013. Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models. J. Climate, 26, 5608–5623. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1. Качественно этот результат согласуется с результатом, полученным [Павлова Т.В., В.М. Катцов, А.А. Пикалева, П.В. Спорышев, В.А. Говоркова, 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. 38–61.], именно в этих областях большинство расчетов показывают наличие мерзлоты в верхнем (3,3 м) слое грунта.

[64] Meehl, G.A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer and K.E. Taylor, 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.,* 88, 1383–1394, DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1383.

сокращения был весьма значительным[65]. При этом, несколько моделей давали исчезновение морского льда в Арктике в конце XXI века для одного из «жестких» сценариев SRES – A2.

По сравнению с CMIP3, в среднем по ансамблю CMIP5 возросла скорость ожидаемого в XXI веке сокращения площади льда в Северном полушарии летом. Это позволило ряду исследователей[66] говорить о возможности исчезновения многолетнего льда в Арктике уже в первой половине XXI века. Весьма радикальное сокращение площади льда особенно в теплый период отмечается для сценария RCP8.5 (рис. 1.15). Для «мягкого» сценария RCP2.6 (здесь не представлен) площадь морского льда практически стабилизируется, хотя и для этого сценария в некоторых моделях во второй половине XXI века происходит превращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в сезонный.

Следует отметить, что полное исчезновение морского льда в Северном полушарии имеет скорее символическое, психологическое, нежели научное или практическое значение (например, с точки зрения разработки и принятия адаптационных мер). Иными словами, сокращение площади льда в Арктике станет (и уже становится) экономически и экологически важным задолго до момента первого полного и, вероятно, непродолжительного (в конце лета) освобождения акватории Северного Ледовитого океана от морского льда когда-нибудь в XXI веке.

Используя в качестве ориентировочного критерия освобождения Арктики от многолетнего морского льда в теплый период вышеупомянутую меру неопределенности оценок, основанных на анализе данных спутниковых наблюдений, (1 млн км^2), можно в первом приближении оценить перспективу «безледного» океана для трех рассматриваемых сценариев (рис. 1.16). К концу XXI века в Арктике площадь минимального в сезонном ходе льда (сентябрь) становится меньше 1 млн км^2 во всех моделях CMIP5 для сценария RCP8.5, меньше, чем в половине моделей – для RCP4.5 и менее, чем в трети моделей – для RCP2.6.

---

[65] Катцов В.М., Алексеев Г.В., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Бекряев Р.В., Говоркова В.А., 2007: Эволюция ледяного покрова Мирового океана в 20-м и 21-м веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 43. № 2. С. 1–17.

[66] Stroeve, J. C., V. Kattsov, A. Barrett, M.Serreze, T. Pavlova, M. Holland, and W.N. Meier, 2012: Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. GRL, 39, L16502, 7 PP., 2012, doi:10.1029/2012GL052676; Wang, M., Overland, J.E., 2012: Summer Arctic sea ice will be gone sooner or later – an update from CMIP5 models // *Geophysical Research Letters*, 39, L18501, doi:10.1029/2012GL052868.

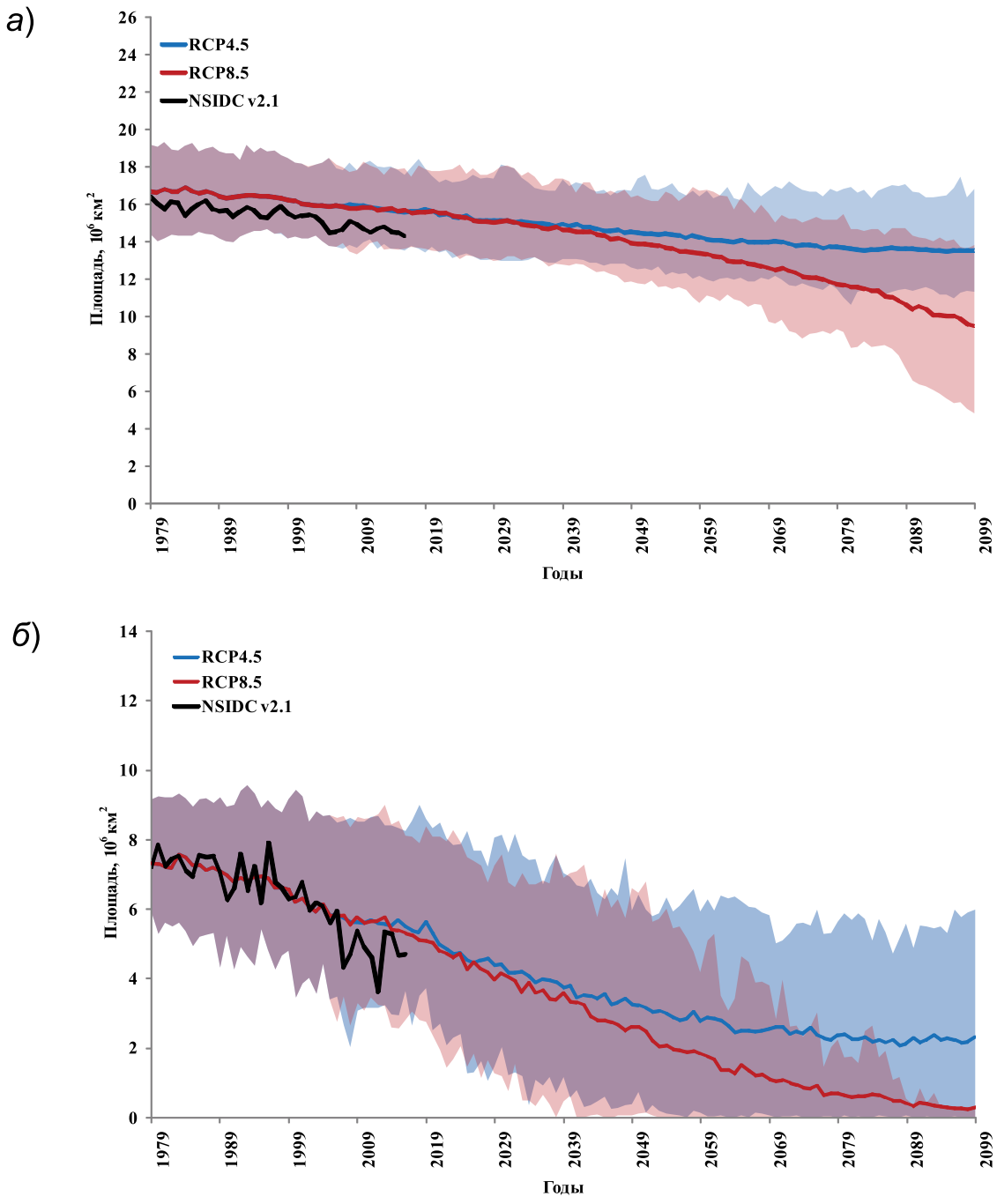

Рис. 1.15. Эволюция площади морского льда в период 1979–2099 гг. в Северном полушарии в феврале и сентябре (а, б) по данным ансамбля из 30 моделей CMIP5 для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 (синяя и красная сплошные линии, соответственно), а также межмодельный разброс в пределах 10-го и 90-го процентилей (голубая и розовая области, соответственно). Для периода 1979–2005 гг. в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный расчет. Для периода 1979–2016 гг. приводится наблюдаемая площадь льда, по данным NSIDC[67] (черная линия).

[67] Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A. (2016). Sea Ice Index, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: 10.7265/N5736NV7

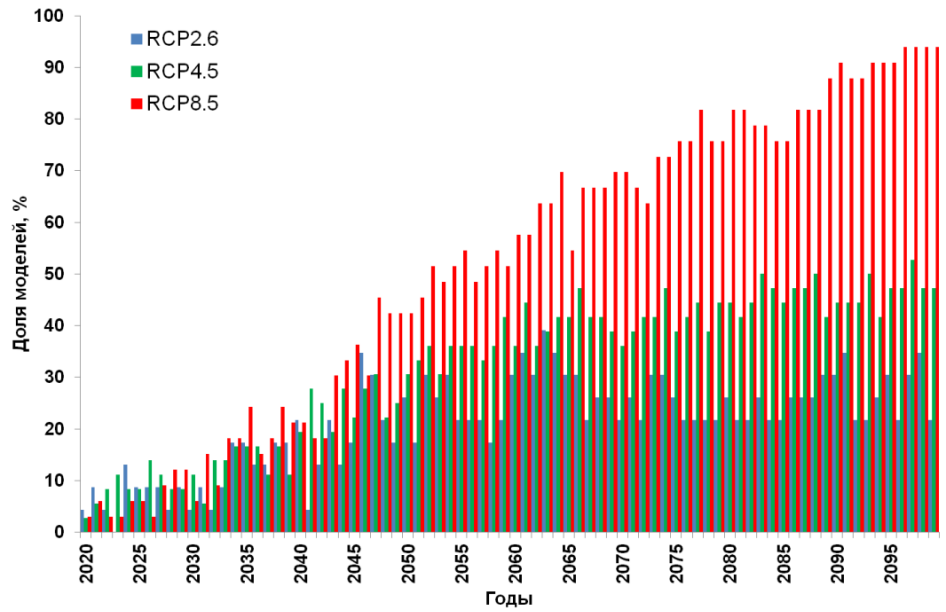

Рис. 1.16. Доля моделей (в процентах от общего числа моделей в ансамбле) CMIP5, в которых площадь морского льда в Северном полушарии в сентябре в период 2020–2099 гг. сократилась до 1 млн км^2 и менее по данным 23 моделей для сценария RCP2.6 (синие столбцы), 36 моделей для сценария RCP4.5 (зеленые столбцы) и 33 моделей RCP8.5 (красные столбцы).

Исчезновение большей части многолетнего льда в Северном Ледовитом океане возможно уже в ближайшие несколько десятилетий. Вероятность превращения ледяного покрова Северного Ледовитого океана в сезонный в середине XXI века, по сравнению с оценками на основе анализа результатов моделей предыдущих поколений, существенно повысилась.

В научном сообществе предпринимаются попытки уточнить оценки будущих изменений климата и, в частности, изменений ледяного покрова Северного Ледовитого океана с помощью дискриминации климатических моделей, формирующих ансамбль. Однако консенсус в отношении пригодных для этого подходов и критериев в настоящее время отсутствует.

Следует упомянуть время от времени появляющиеся прогнозы эволюции ледяного покрова Северного Ледовитого океана в XXI веке с детализацией по десятилетиям[68]. Авторы таких прогнозов основывают их на фундаментальном

[68] См., например, Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалина Т.Ю., 2017: Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария. // *Арктика: экология и экономика*. № 2. С. 35–52. http://arctica-ac.ru/docs/2(26)_2017_Arctic/035_052.pdf; Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., 2007: Климатические изменения ледовых условий в Арктических морях

допущении о периодичности собственных (т. е., не связанных с антропогенным воздействием) колебаний климатической системы и о возможности экстраполяции характеристик этих периодических колебаний в будущее. Согласно некоторым из таких прогнозов, в 2020–2030-х (2040-х) гг. ожидается более или менее интенсивное похолодание и, соответственно, рост ледяного покрова Северного Ледовитого океана. Не вступая здесь в обстоятельную полемику с авторами этих прогнозов, следует все же отметить, что современная наука о климате не допускает сведéния прогнозирования собственных колебаний климатической системы на временных масштабах от межгодового до внутривекового (междесятилетнего) к экстраполяции в будущее тех или иных аппроксимаций данных наблюдений. Собственная изменчивость климатической системы (весьма значительная в Арктике), действительно, предполагает наличие межгодовых и внутривековых колебаний относительно описанных в этом разделе трендов, обусловленных различными сценариями антропогенного воздействия. Однако «прогноз» пространственно-временных характеристик этих колебаний, включая конкретные временные интервалы для аномалий того или иного знака, находится за пределами возможностей современной науки.

Близкая перспектива: вероятностный прогноз изменения температуры в Арктике[69]

Доверие к оценкам будущих изменений климата, получаемых с помощью сложных климатических моделей, опирается на ряд оснований, связанных как собственно с моделями, так и с фундаментальными свойствами описываемой ими климатической системы, в частности, с ее предсказуемостью. Обсуждению этих оснований уделяется довольно много внимания в научной литературе, в том числе – в оценочных докладах об изменении климата.[70]

Евразийского шельфа // *Проблемы Арктики и Антарктики*. № 75. С. 149–160 http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-75/PAA75-15%20(149-160).pdf

[69] Этот параграф базируется на работе: Спорышев, П.В., В.М. Катцов, В.А. Говоркова, 2016: Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 583. С. 45–84.

[70] Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor, 2007: Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; Катцов, В.М., В.П. Мелешко, В.А. Говоркова, Е.Д. Надежина, Т.В. Павлова, И.М. Школьник, 2008: Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата / Оценочный Доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» (А.И. Бедрицкий и др., ред.), т. 1. 112–151.

Одним из важнейших критериев достоверности модельных оценок будущих изменений климата является способность моделей воспроизводить наблюдаемый климат. На сегодняшний день подходы к оценке соответствия модельных расчетов имеющимся данным наблюдений методически достаточно хорошо проработаны. В то же время сохраняется ряд нерешенных проблем, связанных, в частности, с собственной изменчивостью климатической системы. Например, хорошо известно, что эволюция модельного климата в расчетах с одной и той же моделью и на одном и том же компьютере, но от разных начальных условий, может существенно различаться. Это порождает проблему корректности сравнения данных наблюдений, которые, условно, можно рассматривать в качестве одной из возможных «реализаций» климатической системы, с модельным ансамблем, представляющим собой множество подобных реализаций.[71] При этом один из важных вопросов состоит в том, как оценивать вероятностные границы для климатических изменений, полученных в ансамбле.[72]

В этом контексте Арктика занимает особое место, благодаря как интенсивной собственной изменчивости климатической системы в высоких широтах, так и максимальному, по сравнению с другими регионами планеты, ожидаемому потеплению, получаемому на фоне нарастающего с широтой межмодельного разброса оценок.[73] Эти особенности региона существенно затрудняют как оценку качества климатических моделей (с точки зрения их пригодности для использования в оценках будущих изменений климата), так и собственно количественные прогнозы изменения климата Арктики на близкую перспективу (например, на первую треть текущего столетия), когда собственная изменчивость климата Арктики, по меньшей мере, сопоставима по величине с антропогенным сигналом.

---

[71] Спорышев П.В., Катцов В.М., 2006: Пространственно-временные особенности глобального потепления // *Доклады АН*. Т.41. №4. С. 1—6; Спорышев, П. В., В. М. Катцов, В. А. Матюгин, 2012: Согласованность изменений температуры на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. № 1. С.5–19.

[72] Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013: Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 568. С. 51–79.

[73] Катцов, В.М., Т.В. Павлова, 2015: Арктика в контексте «гранд-вызовов» климатической науке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып.579. С. 66–78; Катцов В.М., Т.В. Павлова, 2015: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 579. С. 7–21; Павлова Т.В., В. М. Катцов, 2015: Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 579. С. 22–36.

Статистический анализ соответствия модельных расчетов[74] температурных изменений в континентальных субрегионах Арктики данным наблюдений[75] лег в основу построения вероятностного прогноза[76] изменения температуры приземного воздуха на территории континентальной Арктики[77] на близкую перспективу (2021–2040 гг.).

Даже при полном учете всех внешних воздействий нельзя ожидать, что модели будут способны воспроизвести межгодовые колебания температуры, поскольку значительный вклад в эти колебания вносит собственная, не связанная с

[74] Модельные расчеты представлены четырьмя ансамблями экспериментов с климатическими моделями, участвовавшими в международном проекте сравнения климатических моделей CMIP5. В рамках проекта CMIP5 выполнялись специальные эксперименты по моделированию эволюции климата XIX–XXI веках (1850–2005 гг.) при задании по данным наблюдений всех внешних воздействий на климатическую систему как естественной, так и антропогенной природы. К антропогенным внешним воздействиям, в частности, относятся изменения концентрации в атмосфере основных парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения, а также изменения в землепользовании, а к естественным воздействиям — изменения потока приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы с учетом его спектральной структуры и изменения концентрации аэрозолей естественного происхождения, связанные, например, с извержениями крупных вулканов. Эти эксперименты в проекте CMIP5 называются «Historical». Поскольку модельное интегрирование в этих расчетах завершается в 2005 г., в качестве их продолжения на весь XXI век использовались данные двух типов сценарных экспериментов, в которых внешние воздействия на климатическую систему задавались в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5. Так были сформированы два модельных ансамбля – Hist-RCP4.5 и Hist-RCP8.5, соответственно. Кроме того, с рядом моделей для периода 1850-2005 гг. были выполнены специальные эксперименты, предназначенные для установления причин наблюдаемых климатических изменений, в которых внешние воздействия задавались раздельно. В настоящей работе рассматриваются два ансамбля таких экспериментов: в первом ансамбле все внешние воздействия были фиксированы на уровне 1850 г., а учитывались только изменения концентрации основных парниковых газов (ансамбль Hist-GHG), а во втором учитывались только внешние воздействия естественной природы (ансамбль Hist-Nat). Ансамбли Hist-RCP4.5 и Hist-RCP8.5 составляют 17 расчетов с 17 моделями (по одному расчету с каждой моделью), а ансамбли Hist-GHG и Hist-Nat состоят из 9 расчетов с 9 моделями.

[75] Для оценки температурных изменений на континентах используется архив данных наблюдений за температурой приземного воздуха University of Delaware Terrestrial Air Temperature V4.01 (далее – UD), подготовленный в Университете штата Делавэр (США). Для сравнения иногда используется также архив HadCRUT.4.4.0.0 (далее – HadCRU), подготовленный совместно Отделением климатических исследований Университета Южной Англии и Центром климатических исследований Хэдли Метеорологической службы Великобритании. Существенным недостатком этого архива является наличие значительных пропусков в данных, что затрудняет сравнение с модельными расчетами. Важно отметить, что при осреднении по достаточно большим регионам оба архива дают близкие результаты. Для оценки изменений на всей территории Арктики в области 64-90° с. ш. используются данные анализа приповерхностной температуры (GISTEMP), выполненного в Институте космических исследований им. Годдарда (США).

[76] Термин «прогноз» используется здесь не в строгом смысле, поскольку речь не идет о надлежащем образом инициализированных ансамблевых модельных расчетах.

[77] Основными регионами являются «Континентальная Арктика» (КА) – территория суши в области 60–90° с. ш., и «Российская континентальная Арктика» (РКА) – российская часть КА. «Российская континентальная Арктика», в свою очередь, разделена на три части: европейскую часть – «Российская часть европейской Арктики», и две части в Азии – «Западная часть северной Азии» и «Восточная часть северной Азии» (разделителем между ними служит меридиан 120° в. д.). Кроме того, рассматриваются три континентальных региона, выделенных в международном проекте по адаптации в Арктике – AACA (Adaptation Actions for a Changing Arctic, http://www.amap.no/adaptation-actions-for-a-changing-arctic-part-c). Единственным регионом, включающим как континентальную, так и океаническую части Арктики, является регион «Полярная область» (64–90° с. ш.). Среднегодовые значения по этой области имеются в данных анализа приповерхностной температуры GISTEMP.

внешними воздействиями изменчивость, присущая климатической системе Земли, которая воспроизводится в модельных расчетах только статистически. В рассматриваемых нами расчетах источником близости модельных и наблюдаемых изменений является влияние внешних воздействий, проявляющееся как в масштабах десятилетий (например, влияние изменений газового состава атмосферы), так и в годовых масштабах (например, влияние изменений концентраций аэрозолей антропогенного и естественного происхождения).

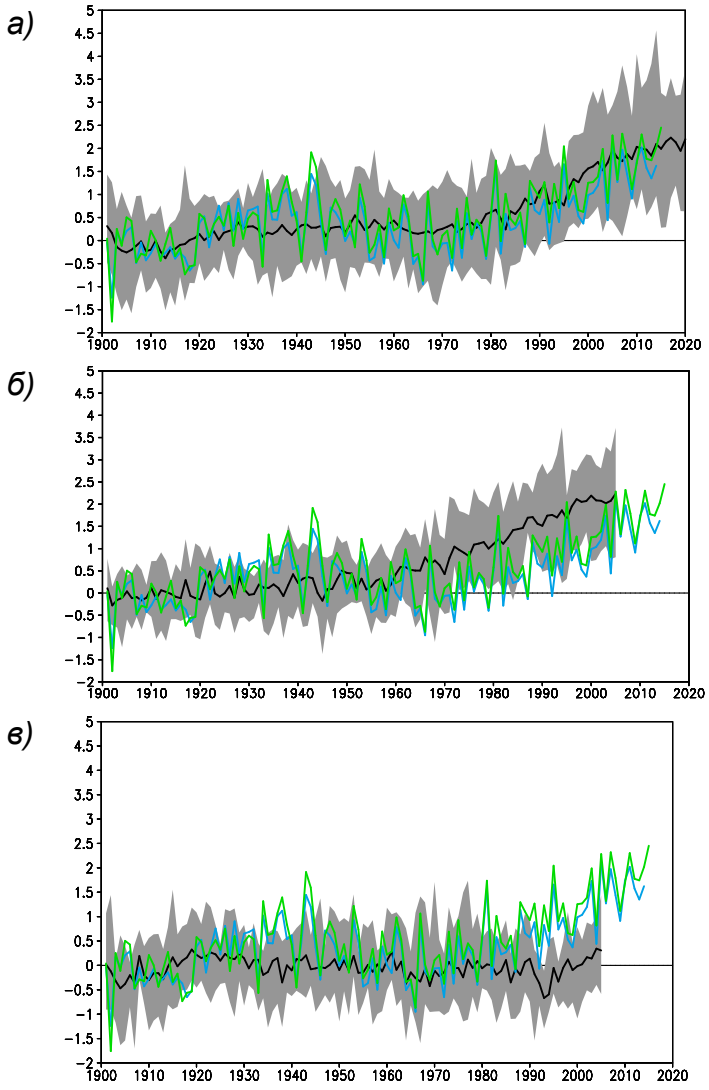

Рис. 1.17. Аномалии среднегодовой температуры приземного воздуха в среднем по региону «Континентальная Арктика» (КА) по данным наблюдений (зеленая (HadCRU) и синяя (UD) кривые) и в среднем по ансамблям Hist-RCP4.5 (*а*), Hist-GHG (*б*) и Hist-Nat (*в*) (черные кривые). Аномалии рассчитаны по отношению к базовому периоду 1901–1930 гг. Серым цветом выделен диапазон разброса оценок по модельным ансамблям. (Пояснения к обозначениям см. в сносках 74, 75 и 77).

Визуально лучше всего модельные расчеты с данными наблюдений согласуются в ансамбле Hist-RCP4.5. Осреднение по модельному ансамблю

показывает повышение температуры, примерно, с 1915 по 1930 гг., затем небольшие колебания и возобновление увеличения температуры с середины 1960-х гг., продолжающееся до конца рассматриваемого периода и по величине соответствующее наблюдаемому потеплению. В научной литературе большое внимание уделяется повышению температуры в Арктике в 1930-1940-х гг. и его причинам.[78] В этом вопросе нет устоявшегося мнения. По-видимому, это потепление было обусловлено рядом причин: увеличением концентрации парниковых газов и изменениями аэрозольного состава атмосферы при значительном вкладе собственной изменчивости. В среднем по модельному ансамблю потепление 1930–1940-х гг. выражено не так отчетливо, как в данных наблюдений, однако, практически, во все годы наблюдаемые значения температуры попадают в область межмодельного разброса. Основные температурные изменения на территории Арктики, связанные с глобальным потеплением, происходят во второй половине XX века. В ансамбле Hist-GHG повышение температуры в последние десятилетия превышает наблюдаемое, а в ансамбле Hist-Nat – повышение температуры отсутствует.

Подробный статистический анализ соответствия модельных расчетов данным наблюдений для периода 1950-2005 гг. показывает, что в этот период влияние внешних воздействий проявляется достаточно явно. Кроме того, для него имеется наиболее полная база данных наблюдений, что отражается как в лучшем согласовании имеющихся архивов наблюдений, так и в более точном задании наблюдаемых внешних воздействий на климатическую систему, используемых в модельных расчетах. Также существенно, что в этот период произошло несколько крупных вулканических извержений: Агунг (март 1963 г.), Фуэго (октябрь 1974 г.), Эль Чичон (апрель 1982 г.) и Пинатубо (июнь 1991 г.), что позволяет оценить влияние изменений концентрации вулканического аэрозоля в атмосфере на колебания температуры в Арктике. Важным установленным фактом[79] является хорошее модельное воспроизведение временной эволюции температуры приземного воздуха в Арктике – в среднем по ансамблю Hist-RCP4.5. Так

[78] Wang M., Overland J.E., Kattsov V., Walsh J.E., Zhang X., Pavlova T., 2007: Intrinsic versus forced variation in coupled climate model simulations over the Arctic during the 20th Century. *J.Climate*, 20, 1084-1098; Спорышев, П.В., В.М. Мирвис, В.М. Катцов, В.П. Мелешко, Э.Я. Ранькова, 2008: Антропогенный вклад в изменение климата / Оценочный Доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» (А.И. Бедрицкий и др., ред.), т.1. 152–173.

[79] Спорышев, П.В., В.М. Катцов, В.А. Говоркова, 2016: Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 583. С. 45–84.

коэффициент корреляции среднегодовой температуры приземного воздуха в КА по данным наблюдений и в среднем по ансамблю Hist-RCP4.5 для периода 1951–2005 гг. составил 0,62. Таким образом, 38 % дисперсии межгодовых изменений температуры воздуха воспроизводится в модельном ансамбле. Несмотря на значимое проявление естественных воздействий в межгодовых колебаниях температуры, основной вклад в наблюдаемое повышение температуры на территории Арктики вносят изменения концентрации парниковых газов.

Две модельные реализации эволюции климатической системы, отличающиеся только начальными условиями, неизбежно будут существенно расходиться. При этом среднее по модельному ансамблю не будет точно совпадать ни с одной из реализаций, ни с данными наблюдений. В таком случае возникают естественные вопросы: что считать результатом прогноза по модельному ансамблю и как правильно сравнивать результаты модельных расчетов с данными наблюдений? Для ответа можно использовать вероятностный подход, при котором предполагается, что каждый член модельного ансамбля является равноправным и взаимозаменимым с любым другим членом ансамбля и с наблюдаемой эволюцией климатической системы.[80] Поэтому при анализе соответствия модельных расчетов данным наблюдений следует ориентироваться не на различия между данными наблюдений и ансамблевым средним, а на «попадание» наблюдаемых изменений в прогнозируемые статистические интервалы, полученные по модельному ансамблю.[81]

---

[80] Спорышев, П. В., В. М. Катцов, В. А. Матюгин, 2012: Согласованность изменений температуры на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // *Метеорология и гидрология.* № 1. С. 5–19; Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013: Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейков.* Вып. 568. С. 51–79.

[81] Точнее говоря, можно построить 90 %-ные «интервалы предсказания» для возможных климатических изменений, и проверять, попадают ли наблюдаемые изменения в эти интервалы. Если задан уровень достоверности α, то при многократной реализации используемой вероятностной модели случайная величина будет с вероятностью α попадать в построенный для нее $(100 \cdot \alpha)$ %-ный интервал предсказания. Проверка попадания наблюдаемого изменения в модельный интервал предсказания эквивалентна статистическому тесту по оценке значимости отклонения наблюдаемого изменения от ансамблевого среднего. Попадание в 90 %-ный интервал означает, что отклонение от ансамблевого среднего не значимо на уровне 10 %. Точное определение и метод построения интервалов предсказания даны в работах: Спорышев, П. В., В. М. Катцов, В. А. Матюгин, 2012: Согласованность изменений температуры на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 5–19; Спорышев П. В., Говоркова В. А., 2013: Температурные изменения на территории России по данным наблюдений и результатам модельных расчетов с раздельным учетом антропогенных и естественных внешних воздействий // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 568. С. 51–79. Там же обсуждается обоснованность этого подхода.

Таблица 1.4. Наблюдаемые изменения температуры приземного воздуха (°C) для периода 2000–2014 гг. по отношению к 1951–1980 гг.

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Континентальная Арктика	1,39	1,56	1,64	0,93	1,42
Российская часть континентальной Арктики	1,47	1,06	2,18	1,00	1,65
Российская часть европейской Арктики	1,34	1,21	1,64	0,89	1,60
Западная часть северной Азии	1,45	1,25	2,18	0,99	1,39
Восточная часть северной Азии	1,55	0,78	2,41	1,06	1,97
Регион Баренцева моря	1,31	1,19	1,67	0,91	1,33
Регион залива Баффина и пролива Дейвиса	1,56	1,85	1,38	1,21	1,78
Регион моря Бофорта и Берингова пролива	1,38	1,84	1,26	0,75	1,55
Полярная область 64-90° с. ш.	1,48				

Таблица 1.5. Изменения температуры приземного воздуха (°C) по модельному ансамблю Hist-RCP4.5 для периода 2000–2014 гг. по отношению к 1951–1980 гг. В скобках показаны соответствующие модельные 90%-ные интервалы предсказания

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Континентальная Арктика	1,49 (0,51;2,48)	2,01 (0,57;3,44)	1,29 (0,30;2,27)	0,94 (0,17;1,71)	1,73 (0,67;2,80)
Российская часть континентальной Арктики	1,57 (0,39;2,75)	2,08 (0,24;3,92)	1,37 (0,14;2,60)	0,92 (0,16;1,68)	1,88 (0,51;3,25)
Российская часть европейской Арктики	1,63 (0,26;3,00)	2,22 (−0,21;4,64)	1,44 (−0,08;2,97)	1,20 (0,20;2,20)	1,59 (0,30;2,88)
Западная часть северной Азии	1,58 (0,21;2,95)	2,06 (−0,29;4,42)	1,40 (0,15;2,65)	0,88 (−0,05;1,82)	1,96 (0,34;3,58)
Восточная часть северной Азии	1,53 (0,43;2,62)	2,04 (0,42;3,66)	1,30 (−0,08;2,68)	0,85 (0,08;1,61)	1,91 (0,60;3,23)
Регион Баренцева моря	1,65 (0,25;3,04)	2,19 (−0,25;4,64)	1,45 (0,07;2,84)	1,15 (0,22;2,07)	1,75 (0,35;3,15)
Регион залива Баффина и пролива Дейвиса	1,44 (0,40;2,48)	1,86 (−0,17;3,90)	1,33 (0,39;2,28)	0,84 (0,21;1,47)	1,75 (0,53;2,98)
Регион моря Бофорта и Берингова пролива	1,70 (0,30;3,09)	2,38 (0,38;4,37)	1,37 (−0,25;2,99)	0,96 (−0,08;2,00)	2,08 (0,45;3,72)
Полярная область 64—90° с. ш.	1,73 (0,59;2,87)	2,29 (0,65;3,93)	1,48 (0,43;2,53)	0,77 (0,21;1,33)	2,36 (0,81;3,91)

Использование такого подхода позволяет эффективно сравнивать наблюдаемые и расчетные изменения. В Арктике наблюдаемые и расчетные

изменения температуры приземного воздуха хорошо согласуются. Для крупных арктических регионов во всех случаях наблюдаемые изменения не выходят за границы модельных 90 %-ных интервалов предсказания (табл. 1.4 и 1.5). Сравнение средних по ансамблю Hist-RCP4.5 изменений температуры приземного воздуха с наблюдаемыми показало, что они заметно расходятся только в зимний и весенний сезоны. Зимой модели в среднем завышают потепление, а весной недооценивают.

Анализ пространственного соответствия результатов модельных расчетов данным наблюдений показал, что температурные изменения, полученные в ансамбле Hist-RCP4.5, хорошо соответствуют наблюдаемым (при наличии статистически значимых различий с данными наблюдений, полученных в других ансамблях). Причем, если в среднем по модельному ансамблю получается потепление во всех точках, то на больших площадях нижняя граница 90 %-ного интервала предсказания оказывается нулевой или отрицательной. Таким образом, в отдельных регионах возможно сохранение и даже понижение средней климатической температуры воздуха, что и происходит по данным наблюдений. Самым стабильным сезоном по модельным расчетам является осень. В частности, модельные расчеты показывают устойчивое потепление на всей территории российской части КА осенью, что хорошо согласуется с данными наблюдений.

По результатам анализа можно сделать вывод о пригодности используемого ансамбля климатических моделей для построения на его основе вероятностного прогноза изменения температуры приземного воздуха на территории континентальной Арктики, в том числе на близкую перспективу (2021–2040 гг.), с соответствующей оценкой вероятностных границ для изменений температуры.

Вероятностный прогноз на 2021–2040 гг. для девяти крупных арктических регионов по двум модельным ансамблям Hist-RCP4.5 и Hist-RCP8.5 представлен в табл. 1.6 и 1.7, соответственно. По ансамблю Hist-RCP4.5 в среднем среднегодовое потепление по региону КА составит около 2,5 °С. Наибольшее потепление, по величине близкое к 3 °С, ожидается зимой и осенью.

Таблица 1.6. Изменения температуры приземного воздуха (°C) по модельному ансамблю Hist-RCP4.5 для периода 2021–2040 гг. по отношению к 1951–1980 гг. В скобках показаны соответствующие модельные 90%-ные интервалы предсказания

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Континентальная Арктика	2,46 (1,23;3,69)	3,17 (1,49;4,86)	2,15 (0,71;3,59)	1,60 (0,49;2,72)	2,90 (1,60;4,20)
Российская часть континентальной Арктики	2,52 (1,12;3,93)	3,23 (1,14;5,33)	2,14 (0,38;3,90)	1,60 (0,36;2,84)	3,09 (1,60;4,57)
Российская часть европейской Арктики	2,59 (1,13;4,04)	3,49 (0,71;6,26)	2,25 (0,87;3,64)	1,89 (0,61;3,17)	2,67 (1,44;3,90)
Западная часть северной Азии	2,53 (0,91;4,15)	3,19 (0,74;5,63)	2,18 (0,15;4,20)	1,55 (0,05;3,05)	3,19 (1,52;4,85)
Восточная часть северной Азии	2,49 (1,19;3,79)	3,19 (1,44;4,94)	2,06 (0,22;3,91)	1,54 (0,34;2,74)	3,14 (1,49;4,79)
Регион Баренцева моря	2,64 (1,13;4,16)	3,51 (0,83;6,18)	2,32 (0,91;3,72)	1,81 (0,52;3,11)	2,89 (1,54;4,23)
Регион залива Баффина и пролива Дейвиса	2,28 (0,89;3,67)	2,87 (0,65;5,09)	1,99 (0,54;3,44)	1,36 (0,37;2,35)	2,94 (1,25;4,62)
Регион моря Бофорта и Берингова пролива	2,88 (1,41;4,36)	3,90 (1,73;6,07)	2,53 (0,91;4,15)	1,65 (0,36;2,94)	3,43 (1,70;5,17)
Полярная область 64—90° с. ш.	2,89 (1,45;4,34)	3,86 (1,79;5,94)	2,49 (1,16;3,82)	1,30 (0,49;2,11)	3,92 (1,93;5,91)

Таблица 1.7. Изменения температуры приземного воздуха (°C) по модельному ансамблю Hist-RCP8.5 для периода 2021–2040 гг. по отношению к 1951–1980 гг. В скобках показаны соответствующие модельные 90 %-ные интервалы предсказания

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Континентальная Арктика	2,74 (1,32;4,16)	3,51 (1,60;5,42)	2,44 (0,79;4,08)	1,79 (0,62;2,96)	3,21 (1,68;4,75)
Российская часть континентальной Арктики	2,88 (1,30;4,46)	3,72 (1,56;5,89)	2,48 (0,54;4,42)	1,87 (0,61;3,13)	3,44 (1,70;5,19)
Российская часть европейской Арктики	2,90 (1,52;4,27)	4,05 (1,71;6,39)	2,47 (0,90;4,04)	2,21 (0,95;3,48)	2,88 (1,49;4,27)
Западная часть северной Азии	2,90 (1,20;4,60)	3,74 (1,38;6,10)	2,47 (0,42;4,53)	1,78 (0,41;3,16)	3,59 (1,59;5,60)
Восточная часть северной Азии	2,86 (1,21;4,51)	3,57 (1,37;5,78)	2,49 (0,24;4,75)	1,82 (0,49;3,16)	3,50 (1,71;5,29)
Регион Баренцева моря	2,96 (1,46;4,46)	4,06 (1,65;6,47)	2,54 (0,95;4,12)	2,11 (0,87;3,35)	3,13 (1,59;4,67)
Регион залива Баффина и пролива Дейвиса	2,50 (1,08;3,92)	3,04 (0,82;5,26)	2,30 (0,78;3,82)	1,45 (0,49;2,41)	3,20 (1,63;4,77)
Регион моря Бофорта и Берингова пролива	3,19 (1,37;5,00)	4,28 (1,63;6,92)	2,83 (0,91;4,75)	1,74 (0,28;3,19)	3,87 (1,81;5,94)
Полярная область 64—90° с.ш.	3,18 (1,37;4,98)	4,17 (1,57;6,76)	2,77 (1,08;4,46)	1,42 (0,53;2,32)	4,32 (1,95;6,70)

Результаты по ансамблю Hist-RCP8.5 принципиально не отличаются. При этом прогнозируемое потепление по этому ансамблю в среднем больше на 0,2—0,3 °С, что и следовало ожидать, поскольку по сценарию RCP8.5 концентрация парниковых газов в атмосфере растет быстрее.

Вероятностный прогноз изменения температуры приземного воздуха на территории континентальной Арктики имеет выраженную сезонную специфику (рис. 1.18). В зимний и, особенно, осенний сезоны регион с высокой (95%-ный) вероятностью будет теплеть практически повсеместно, несмотря на собственную изменчивость климатической системы. В частности, осенью ожидаемое потепление превышает 1 °С на большей части российской континентальной Арктики.

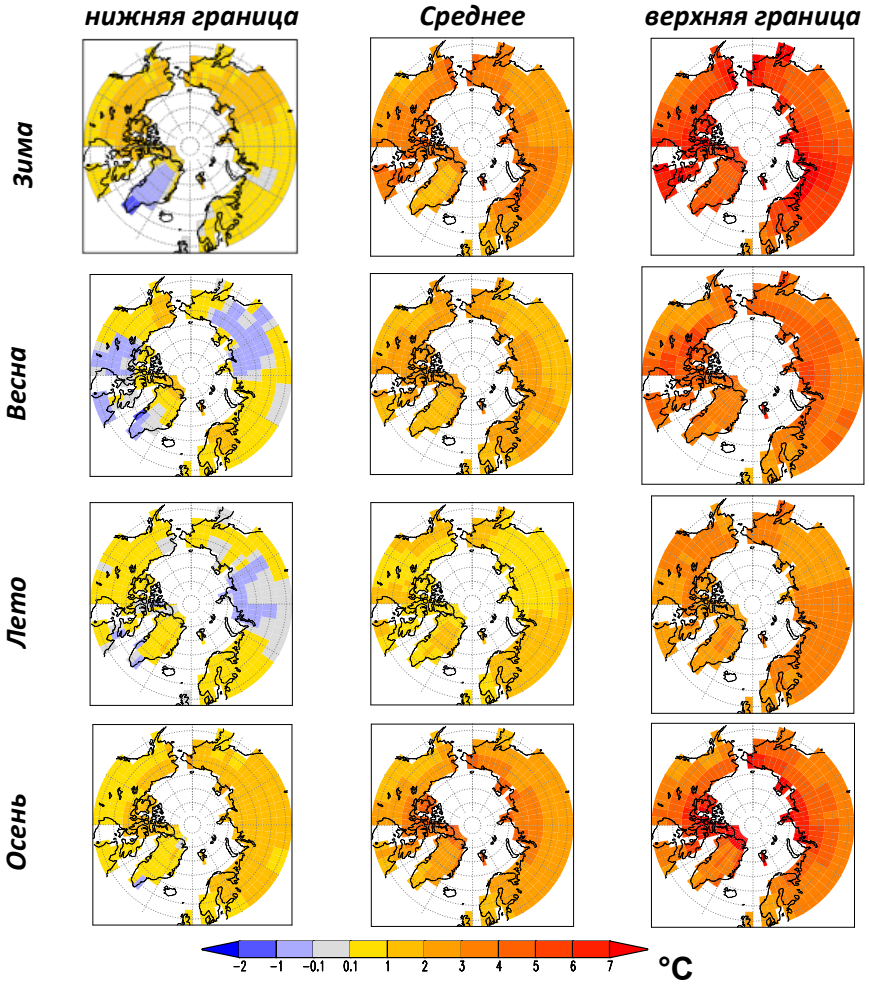

Рис. 1.18. Вероятностный прогноз изменения температуры приземного воздуха на территории континентальной Арктики в среднем для периода 2021–2040 гг. в аномалиях (°С) по отношению к периоду 1951–1980 гг. по модельному ансамблю Hist-RCP4.5. Для каждого сезона (зимы, весны, лета и осени СП, по строкам сверху вниз) в соответствующей строке слева направо показаны: нижняя граница 90%-ного интервала предсказания, среднее по модельному ансамблю и верхняя граница 90%-ного интервала предсказания.

Эта особенность сохраняется и в весенне-летний период в континентальных частях регионов Баренцева моря, а также моря Бофорта и Берингова пролива. В то же время, в западной части северной Азии и некоторых других регионах положение нижней границы 90%-ного интервала предсказания не исключает возможности связанного с собственной изменчивостью климата похолодания (в среднем за двадцатилетие), превосходящего по интенсивности фоновое антропогенное потепление. В то же время верхние границы 90%-ного интервала предсказания однозначно указывают на потепление во все сезоны, достигающее особенно больших значений (5-7ºС) в холодное время года.

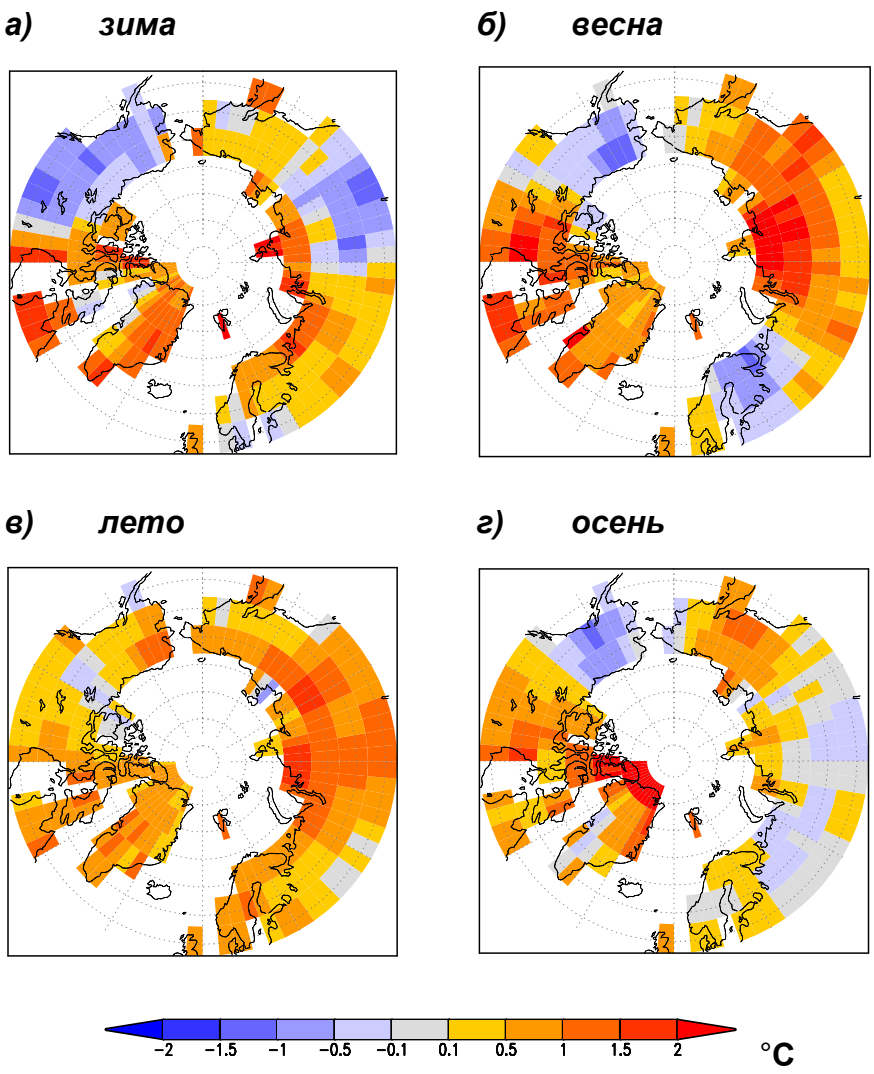

Рис. 1.19. Изменения ширины 90 %-ных интервалов предсказания (°С) в сезонных (зима (*а*), весна (*б*), лето (*в*) и осень (*г*) СП) прогнозах температуры приземного воздуха для периода 2021–2040 гг. по отношению к соответствующим прогнозам для периода 2000–2014 гг.

На рис. 1.19 показано изменение ширины 90 %-ных интервалов предсказания в сезонных прогнозах температуры приземного воздуха для

периода 2021–2040 гг. по отношению к соответствующим прогнозам для периода 2000–2014 гг. Если для лета межмодельный разброс в оценках потепления растет, практически, повсеместно, то в другие сезоны имеются большие регионы, где межмодельный разброс не увеличивается. Например, осенью на большей части территории российской континентальной Арктики ширина 90%-ных интервалов предсказания меняется очень мало или даже уменьшается. Особенно значительно ширина интервалов предсказания уменьшается на полуострове Аляска во все сезоны кроме лета.

Полученная картина ожидаемых в близкой временной перспективе изменений приземной температуры воздуха в Арктике может быть детализирована в вероятностном пространстве за счет привлечения большего числа членов мультимодельного ансамбля[82]; а также дополнена другими климатическими характеристиками.

[82] Это было сделано в работе: Спорышев П.В., Катцов В.М., Гулев С.К., 2018: Изменения приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // *Доклады РАН* (в печати).

2. Детализированные оценки ожидаемых климатических воздействий в Арктической зоне Российской Федерации[83]

Существовавшие до недавнего времени оценки будущих изменений климата в Арктике и их воздействий на хозяйственную деятельность были основаны на расчетах с глобальными моделями сравнительно грубого пространственного разрешения.[84] Использование информации о климате для обеспечения современных потребностей развития экономики требует повышения информативности сценарных прогнозов климата на региональном уровне.

В настоящем разделе представлены детализированные оценки климатических изменений наиболее важных показателей приземной температуры воздуха и режима увлажнения на территории российской Арктики в XXI веке.

В основу оценок положены результаты численных экспериментов с использованием региональной климатической модели (РКМ) ГГО[85], которые были проведены для Арктического региона в рамках международного проекта CORDEX[86]. Изменения климатических факторов обсуждаются в контексте анализа современного состояния и перспективы развития ключевых региональных сегментов экономики. В отличие от работы[87], где рассматривается влияние изменений климата на морскую деятельность, здесь основное внимание уделяется анализу климатических воздействий, затрагивающих материковую часть российской Арктики.

Современные глобальные климатические модели позволяют описывать климатообразующие процессы в определенном диапазоне пространственных масштабов – от глобального до регионального. Однако использование этих моделей в большинстве прикладных исследований регионального климата, в частности, в Арктике, имеет ряд существенных ограничений, связанных с занижением пространственной, а также собственной временной изменчивости климатической системы, включая воспроизведение опасных погодных явлений.

---

[83] Раздел базируется 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* (в печати).

[84] Росгидромет, 2014.

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

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

[87] 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

Эти ограничения связаны с пространственным разрешением современных глобальных моделей, которое зачастую является недостаточным, и – как следствие – с ограниченным учетом влияния региональных особенностей подстилающей поверхности на мезомасштабную атмосферную циркуляцию и характеристики приземного климата.

Полезным источником 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.[88] Региональные климатические модели применяются для ограниченных областей субконтинентального масштаба с использованием на боковых границах модельных областей данных об эволюции глобального климата. Если большинство современных глобальных климатических моделей имеют разрешение в диапазоне 100–300 км, то региональные климатические модели к настоящему времени в ряде случаев уже перешагнули рубеж 10 км. Наиболее распространенным на сегодняшний день разрешением таких моделей является 20–30 км, однако часто используется и более низкое – 50 км. Разрешение в несколько десятков километров 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 таких особенностей обусловливает успешное использование региональных моделей в задачах комплексной оценки климатических воздействий на социально-экономическое развитие регионов.

Международный проект CORDEX[89] организован под эгидой Всемирной Программы Исследования Климата[90] с целью скоординированной оценки будущих климатических изменений в различных регионах мира с использованием региональных климатических моделей. Проектом предусмотрен единый протокол расчетов с граничными условиями в атмосфере и на поверхности океана,

[88] Laprise R. Regional climate modeling. *J. Comput. Phys.*, 2008, 227, no. 7, 3641–3666; doi:10.1016/j.jcp.2006.10.024; Christensen J.H., Kjellstrom E., Giorgi F. et al. Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, 2010, 44, № 2–3, 179–194; doi: DOI 10.3354/cr00916; Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н., 2012: Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине 21 века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // *Метеорология и гидрология.* № 2. С. 5–23; Rummukainen M. Added value in regional climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*, 2016, 7, 145–159; doi: 10.1002/wcc.378.

[89] http://www.cordex.org

[90] https://www.wcrp-climate.org

полученными за периоды 1950–2005 гг. (исторический) и 2006–2100 гг. (прогностический) по моделям CMIP5[91]. В проекте могут участвовать региональные климатические модели с разрешением не грубее 50 км (некоторые модели представляют расчеты и с более высоким разрешением – 25 км).

РКМ ГГО[92] с пространственным разрешением 50 км участвует в соответствующем подпроекте[93] CORDEX.[94] Расчетная область РКМ ГГО охватывает Арктический регион целиком. Ниже приводятся результаты анализа будущих изменений климата, полученные на основе расчета климата на 150 лет (1951–2100 гг.), для части этой расчетной области, включающей «сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации»[95].

2.1 Ожидаемые климатические воздействия на 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.

Для оленеводства сокращение периода с отрицательными температурами воздуха (рис. 2.1), увеличение числа переходов температуры через нулевую отметку (рис. 2.3), а также рост количества осадков (рис. 2.2), 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. Происходящие климатические изменения в теплый период года (рис. 2.4), особенно на северо-востоке Арктической зоны Российской Федерации, создадут более благоприятные возможности для развития растениеводства по сравнению с современными условиями.

---

[91] Taylor K.E., Stouffer R.J. and Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2012, 93, 485-498; doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1

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

[93] http://www.climate-cryosphere.org/activities/targeted/polar-cordex/arctic

[94] В соответствии с форматом CORDEX, в качестве граничных условий РКМ ГГО использует поля температуры, влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления с разрешением по времени 6 часов, а также температуру поверхности океана, сплоченности и толщины морского льда из расчетов с использованием глобальной модели MPI-ESM-LR за исторический (1951–2005 гг.) и прогностический (2006–2100) периоды для сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5.

[95] В соответствии с терминологией, используемой в указе Президента Российской Федерации №296 от 2 мая 2014 г. http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d4d8e8206d56fc949d.pdf

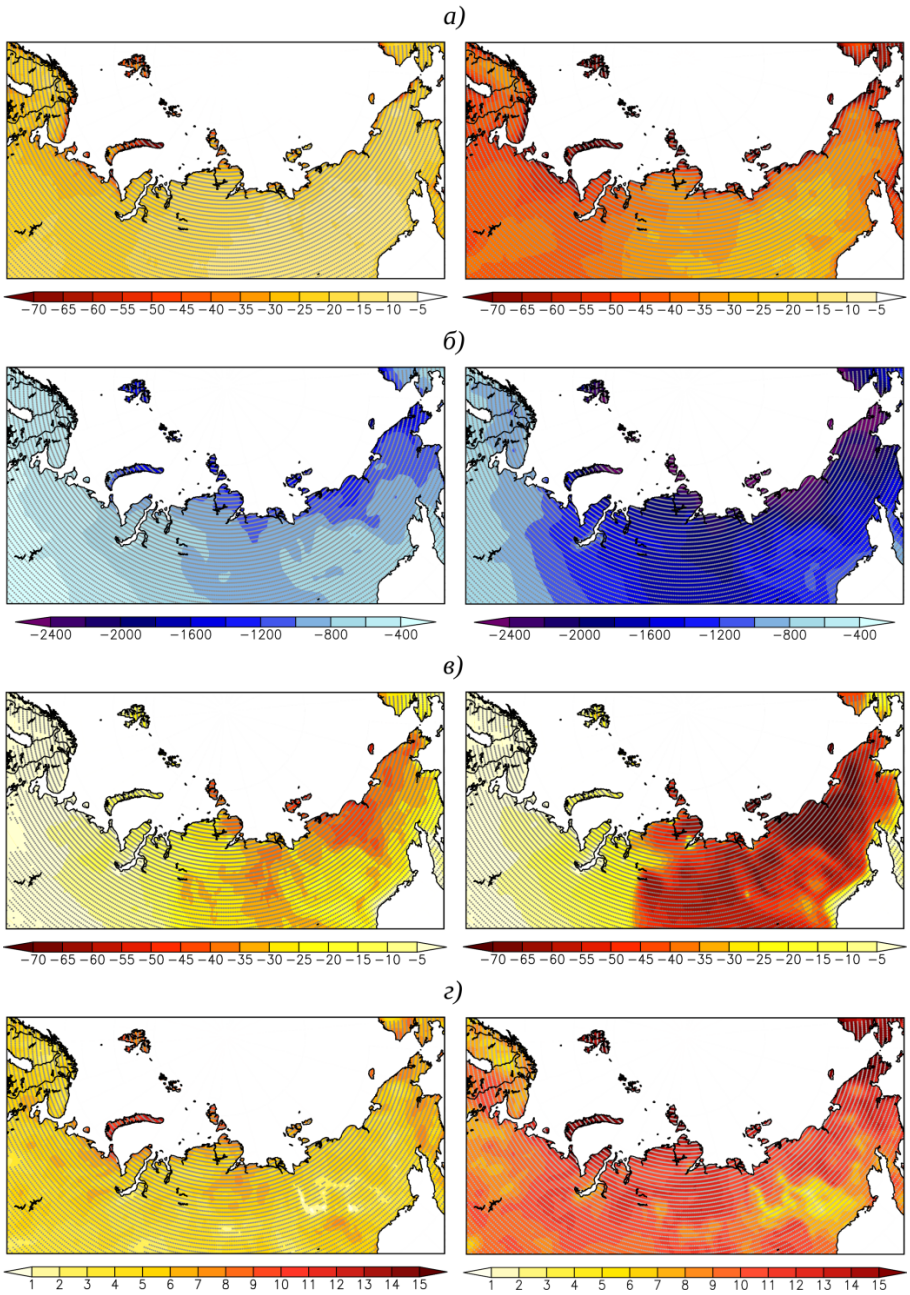

Рис. 2.1. Изменение средних многолетних значений температурных показателей суровости климата к середине XXI века (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981–2000 гг. (РКМ ГГО «CORDEX_ARCTIC»; сценарий RCP8.5):

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

б) градусо-дни с отрицательной температурой воздуха (°С × сутки);

в) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже −30°С;

г) годовой минимум средней суточной температуры воздуха (°С).

Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5 %.

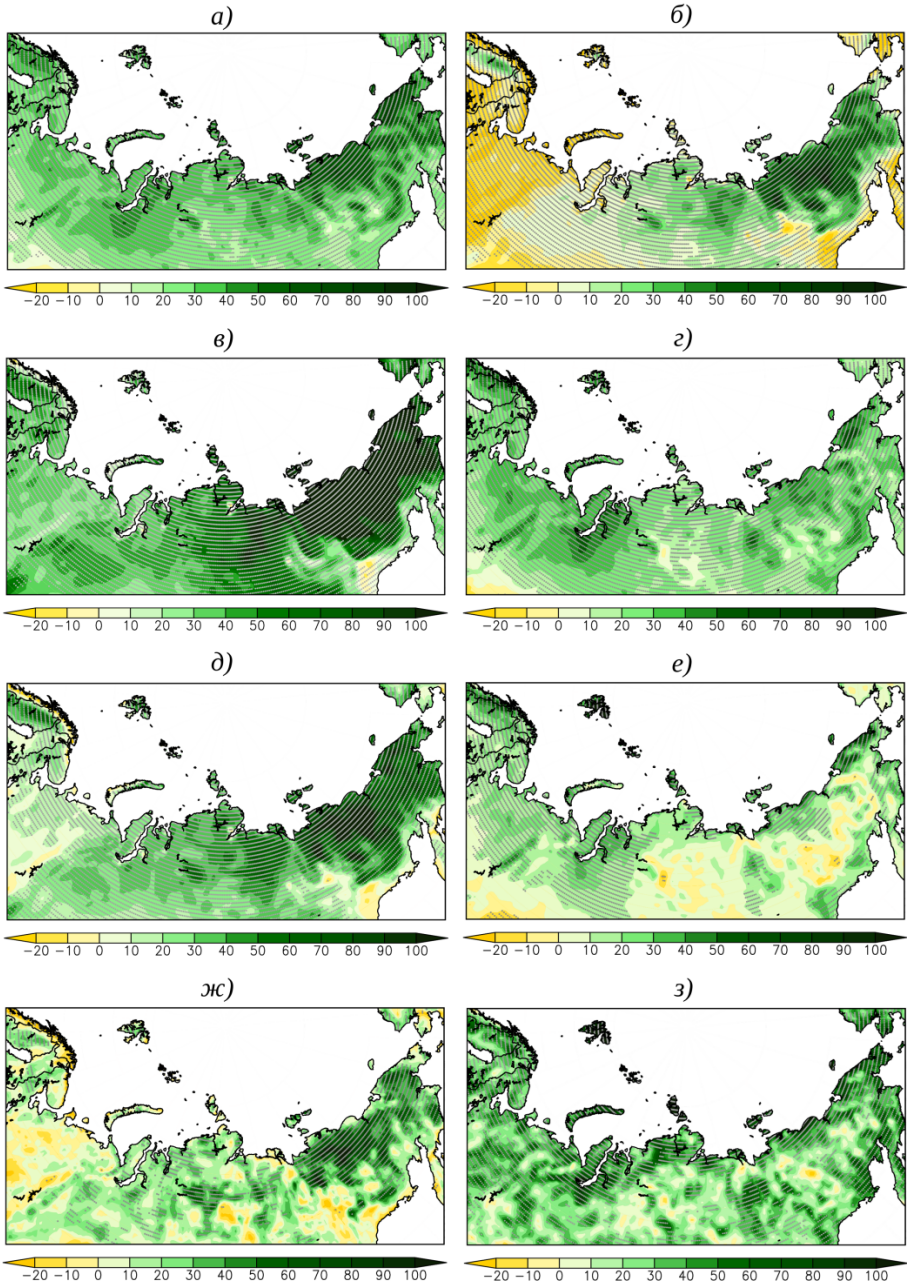

Рис. 2.2. Изменение (%) средних многолетних значений показателей увлажнения к концу XXI века по отношению к базовым значениям за 1981–2000 гг. (РКМ ГГО «CORDEX_ARCTIC»; сценарий RCP8.5):

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

Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5 %.

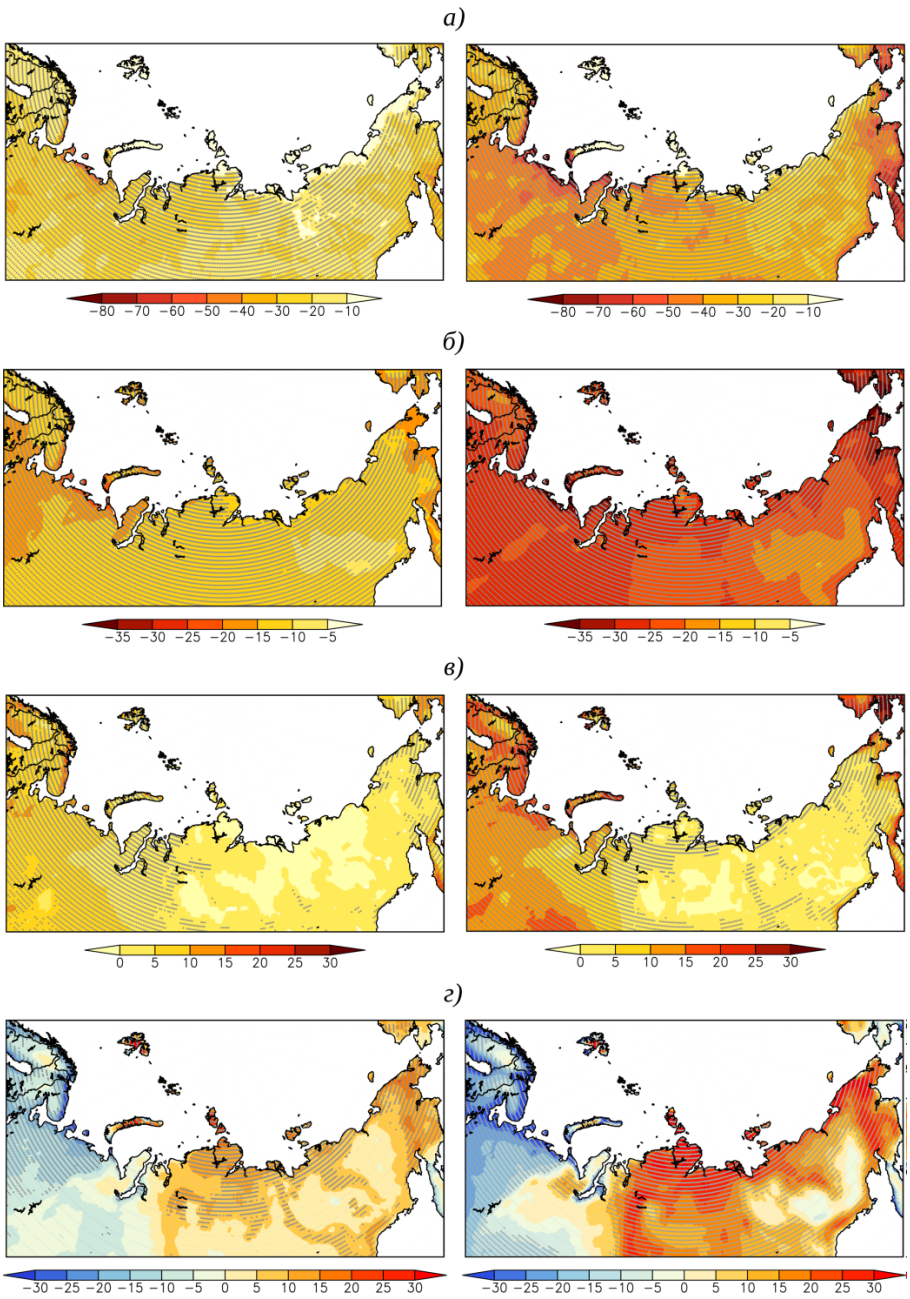

Рис. 2.3. Изменение средних многолетних значений специализированных температурных показателей холодного периода года к середине XXI века (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981–2000 гг. (РКМ ГГО «CORDEX_ARCTIC»; сценарий RCP8.5):

а) продолжительность (дни) отопительного периода;

б) индекс потребления энергии (%) за отопительный период;

в) число дней с переходом температуры воздуха через 0°С (ноябрь–март);

г) число дней, благоприятных для рекреации (-15°С <Тсут <-5°С).

Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5%.

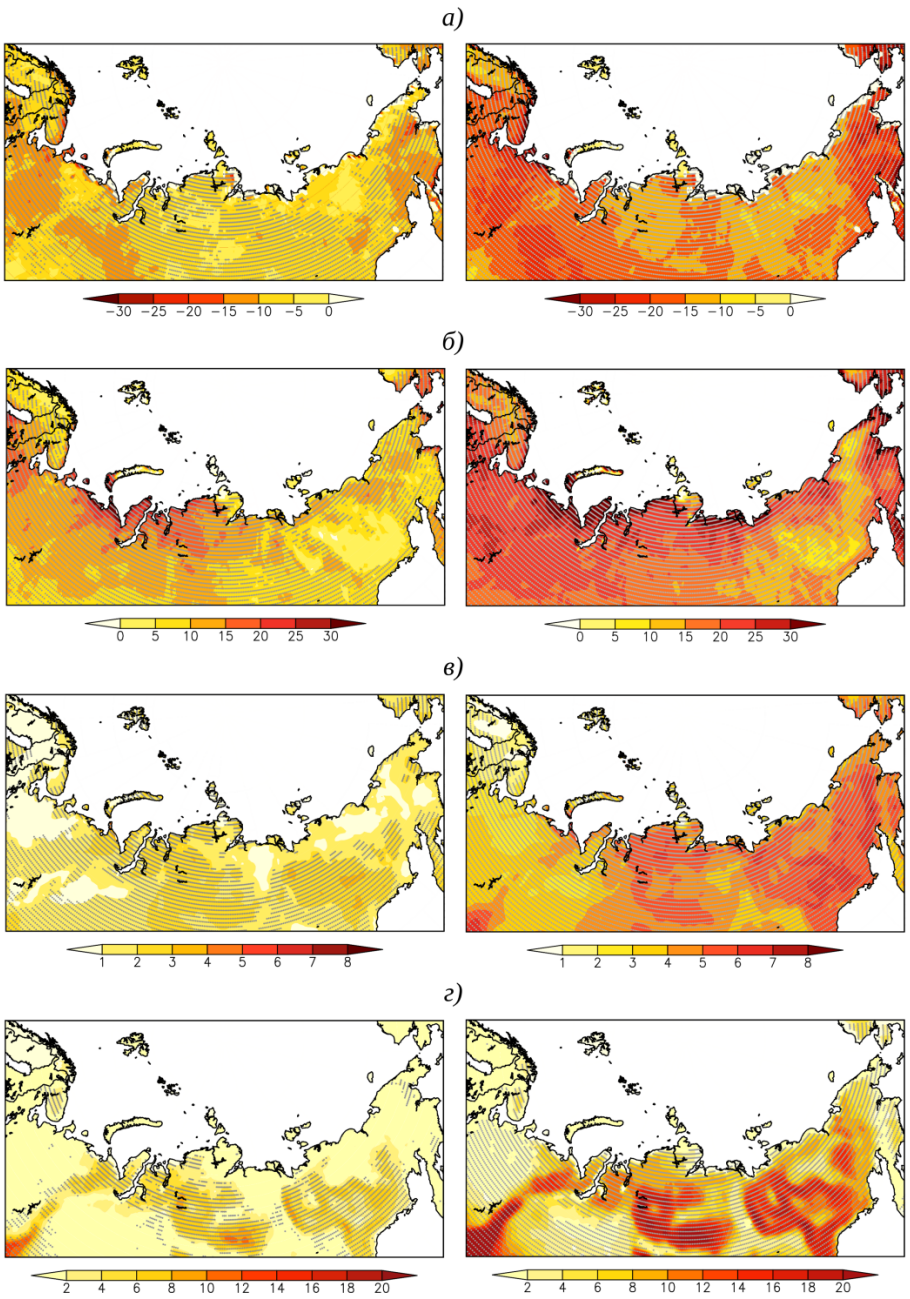

Рис. 2.4. Изменение средних многолетних значений показателей термического режима теплого периода года к середине XXI века (слева) и концу XXI века (справа) по отношению к базовым значениям за 1981-2000 гг. (РКМ ГГО «CORDEX_ARCTIC»; сценарий RCP8.5):

а) дата устойчивого весеннего перехода через +5°С (дни);

б) дата устойчивого осеннего перехода через +5°С (дни);

в) годовой максимум средней суточной температуры воздуха (°С);

г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +25°С.

Штриховкой выделены области со значимыми изменениями при уровне значимости 5 %.

Уменьшение суровости климата[96], создающее предпосылки для более комфортного проживания населения в регионе, является наиболее выраженным в Восточной Арктике (рис. 2.1). Значительно уменьшается число дней с экстремально низкими и опасными для здоровья человека температурами воздуха (рис.2.1), растет число дней с температурой в диапазоне от –5°С до –15°С, который рассматривается в биоклиматологии[97] как наиболее благоприятный для прогулок и занятий зимними видами спорта (рис. 2.3). В Западной Арктике потепление в холодный период года сопровождается негативными проявлениями: возрастает число дней с переходом температуры воздуха через нулевую отметку, уменьшается число зимних дней с благоприятными для рекреации температурными условиями (рис. 2.3).

Рост летних экстремумов и увеличение числа дней с жаркой погодой (рис. 2.4) негативно отразится на экологической обстановке в промышленных районах и состоянии здоровья населения. Высокие климатические риски для населения обусловлены такими проявлениями изменения климата в регионе как усиление штормовой активности, рост интенсивности осадков, наводнения и затопления, эрозия берегов, утрата территорий (в том числе, и в результате таяния вечной мерзлоты).

[96] Заболотник С.И., 2010: Суровость климатических условий на территории России // *География и природные ресурсы*. № 3. С. 69–74.
[97] Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. – СПб, Гидрометеоиздат, 2005, 319 с.

2.2 Ожидаемые климатические воздействия на отрасли экономики

В современных условиях освоение Арктики путем эксплуатации отдельных месторождений сменилось концепцией комплексного вовлечения территорий в хозяйственный оборот в соответствии с долгосрочными национальными программами их развития. К настоящему времени сформирован обширный перечень инвестиционных проектов, запланированных к реализации на территории Арктической зоны Российской Федерации, 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 века, 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 и на шельфе.[98] Прямое воздействие происходящих изменений термического режима в холодный сезон на протяжении XXI века является благоприятным для нефтегазового сектора. Потепление, сопровождаемое сокращением продолжительности зимнего сезона и уменьшением градусо-дней с отрицательной температурой воздуха (рис. 2.1), создает более благоприятные условия для производства буровых работ и прокладки трубопроводных сетей. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30°C (рис. 2.1) приведет к

[98] 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.

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. 2.2). На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) ожидаемое к концу XXI века 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[99] в Азиатской части. В период с апреля по октябрь на большей части Арктической зоны Российской Федерации относительное увеличение количества осадков не столь значительно; максимальные значения (около 50 %) достигаются на территории ЯНАО.

На всей территории Арктической зоны Российской Федерации отмечается выраженный рост суточной интенсивности осадков при отрицательной температуре воздуха (рис. 2.2). На Азиатской территории Арктической зоны Российской Федерации – в отличие от Европейского Севера – ожидается также рост суммы осадков, выпадающих при отрицательной температуре воздуха, и - соответственно – увеличение снегонакопления (рис. 2.2).

Увеличение интенсивности зимних осадков (рис. 2.2) 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.[100] На фоне глобального потепления значительную роль в деградации играют техногенные составляющие

[99] Свод правил СП20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. — М.: Минрегион России, 2011, 96 с.
[100] Росгидромет, 2014.

регионального и локального масштабов. Оценки, основанные на использовании региональной климатической модели с добавлением мезомасштабных блоков атмосферного пограничного слоя и теплопереноса в грунтах[101], позволят детализировать пространственные распределения скорости деградации вечной мерзлоты, полученные по ансамблю глобальных моделей CMIP5[102].

Система энергоснабжения

Арктическая зона Российской Федерации 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. 2.3). На северо-востоке Европейского Севера уменьшение составит 40–50 дней к середине XXI века, 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

[101] Надёжина Е.Д., Орленко Л.Р., Пикалёва 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; Пикалёва А.А., Надёжина 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.

[102] Павлова Т.В., Катцов В.М., Пикалёва 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.

значительному уменьшению дефицита тепла за отопительный период, величина которого может рассматриваться как индекс потребления энергии.[103] Это уменьшение будет наиболее выраженным на Азиатском Севере – в малонаселенных районах с суровыми климатическими условиями (рис. 2.3). К концу XXI века на Чукотском полуострове ожидается уменьшение дефицита тепла на 3000°С×сут. и более. Относительное уменьшение будет наибольшим в Западной Арктике (до 30 % к концу XXI века). Однако для полноценного извлечения выгод, связанных с потеплением, требуется широкое внедрение современных технологий производства энергии в сочетании с комплексной модернизацией системы теплоснабжения и тепловых сетей.

Наземная транспортная инфраструктура

Учет региональных изменений климатического воздействия на объекты наземной инфраструктуры особенно актуален при реализации крупных проектов по развитию транспортной сети в регионе. Среди приоритетных проектов в сфере развития транспортной инфраструктуры в Арктике можно выделить «Северный широтный ход» – строительство железнодорожной магистрали (включая мост через реку Обь), которая свяжет действующие участки Северной и Свердловской железных дорог. Одновременно предполагается существенное развитие автомобильной сети; планируется строительство объектов аэродромной инфраструктуры (Норильск, Нарьян-Мар, Тикси).

Климатические характеристики лежат в основе принимаемых решений по выбору типов применяемых конструкций и материалов, технологии работ и организации строительства.[104] Происходящие изменения термического режима являются благоприятными с точки зрения производства работ. Растет число дней с температурой воздуха меньше –30ºС, приемлемых для работ на открытом воздухе (рис. 2.1). Уменьшается период с отрицательными значениями температуры воздуха (рис. 2.1), когда невозможно выполнение отдельных строительных работ («мокрых работ»).

С точки зрения надежности существующих и проектируемых сооружений важной является адекватная оценка изменений характеристик экстремальности

[103] 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.

[104] Свод правил СП20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. —М., Минрегион России, 2011, 96 с.; Свод правил СП131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М.: Минрегион России, 2012, 386 с.

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. 2.1). Это увеличение сравнительно невелико в Западной Арктике и весьма значительно в восточных регионах (до 10–15 ºС к концу века). Региональный анализ изменения годовых максимумов средней суточной температуры воздуха (рис. 2.4) 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 сооружении в регионе представляется преждевременным. В ряде работ[105], отмечалось, что в Азиатской части территории России выявляются области, где потепление может сопровождаться увеличением отклонений экстремально-высоких температур от средних значений и усилением температурных воздействий (нагрузок) на сооружения. Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют об актуальности дальнейшего исследования вопроса о температурных воздействиях в условиях изменения климата с применением ансамблевого подхода и привлечением статистических методов интерпретации[106].

Важное проявление температурных воздействий на сооружения связано с частыми переходами температуры воздуха через 0 ºС. Такие переходы, наряду с большими перепадами температуры воздуха, приводят к ускоренному старению материалов, из которых сделаны сооружения (дороги, мосты, тоннели, взлетно-посадочные полосы аэродромов, здания и др.) и как результат – к снижению срока их службы. На протяжении XXI века этот отрицательный эффект потепления

[105] 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. 2014. с. 801–830; http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52; 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.

[106] 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.

будет в наибольшей степени проявляться на Европейской территории и, в частности, в Западной Арктике (рис. 2.3).

Существенным негативным фактором, воздействующим на транспортную инфраструктуру, является рост количества и интенсивности осадков (рис. 2.2). Особенно высокие риски связаны с увеличением экстремальных суточных сумм осадков в теплый сезон, которые приводят к потере устойчивости склонов, возникновению оползней и разрушению объектов.

Портовая инфраструктура

Стратегия развития Северного морского пути и его 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. 2.1), 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. 2.4), 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. 2.2) 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,[107] обращается внимание на сравнительно более значительное протаивание песчаных грунтов, которые характерны для русел рек в северной части Западной Сибири и на Ямале.

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. 2.1), увеличение продолжительности вегетационного сезона (рис. 2.4)), 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. 2.2), 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.

[107] Надёжина Е.Д., Орленко Л.Р., Пикалёва 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; Пикалёва А.А., Надёжина 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.

2.3 Дальнейшие шаги в оценке региональных климатических воздействий

Анализ результатов расчетов, выполненных на основе данных регионального моделирования, дает 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 в настоящем разделе было 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.

В качестве следующего шага, направленного на повышение информативности сценарных прогнозов климата для Арктической зоны Российской Федерации, естественно рассматривать переход к расчетам по региональной модели для ансамбля начальных и граничных условий, а также привлечение других моделей, участвующих в проекте CORDEX, с последующим анализом неопределенности получаемых количественных оценок.

Построение большого ансамбля расчетов с региональной климатической моделью ГГО на основе комбинирования начальных условий и условий на нижней границе в глобальной модели общей циркуляции атмосферы (также ГГО), используемой при генерации боковых граничных условий для региональной модели, демонстрирует дополнительные возможности вероятностного прогнозирования изменений климата, в том числе на короткую временную перспективу (рис. 2.5).[108]

Для обеспечения достоверности результатов целесообразно сочетание динамических и статистических методов в рамках развиваемого ансамблевого подхода. В первую очередь это относится к анализу климатических экстремумов редкой повторяемости, во многом определяющих надежность существующих и проектируемых сооружений.

[108] Подробнее об этих численных экспериментах см. Катцов, В.М., И.М. Школьник, С.В. Ефимов, 2017: Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах // *Метеорология и гидрология*. № 7. С.68–80.

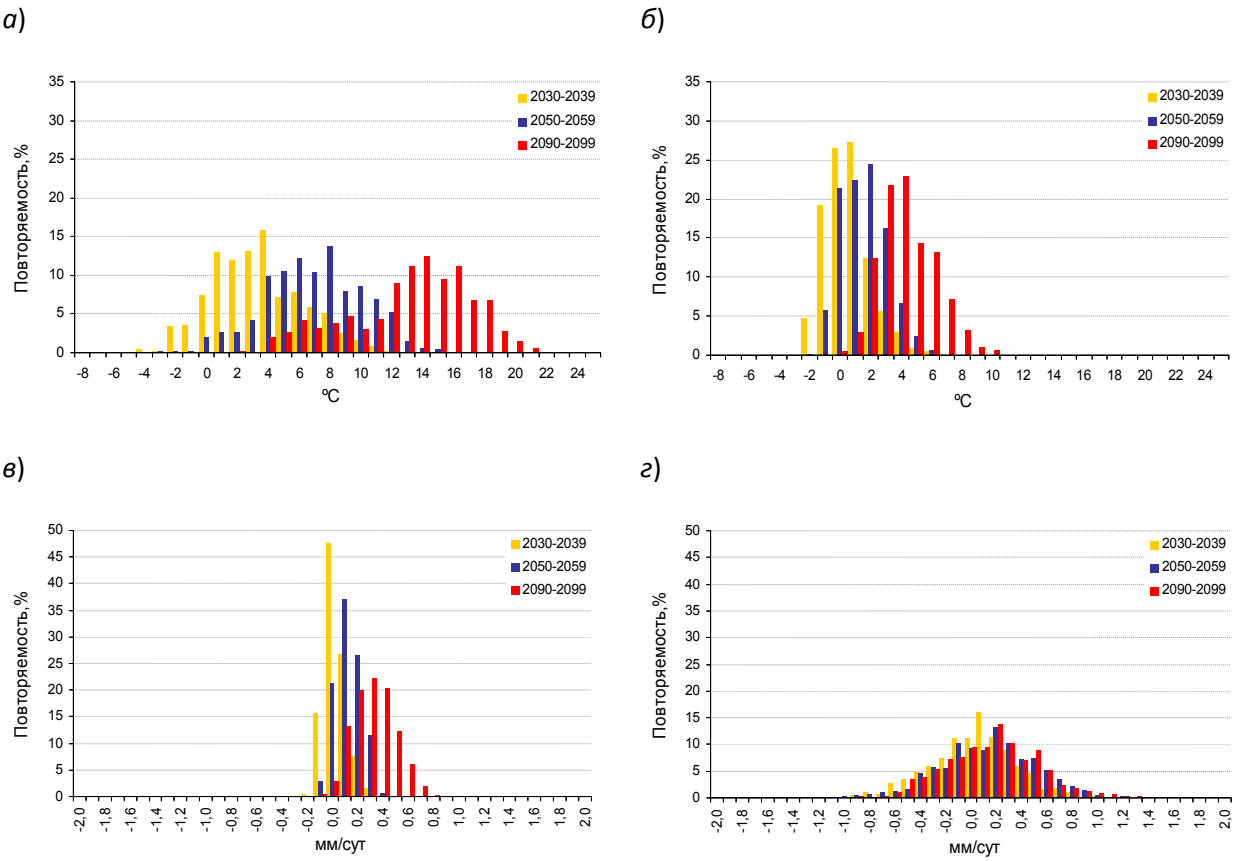

Рис. 2.5. Вероятностные функции распределения изменений температуры воздуха (*а, б*) и осадков (*в, г*) зимой (*а, в*) и летом (б, г) **для Ямало-Ненецкого автономного округа, рассчитанные с помощью региональной климатической модели ГГО по ансамблю из 50 членов для трех временных интервалов: 2030–2039 гг., 2050–2059 гг. и 2090–2099 гг., по отношению к периоду 1990–1999 гг. Сценарий RCP8.5.**

Указанные подходы существенно повышают содержательность перспективных оценок изменения климата и открывают широкое поле для исследований, конечной целью которых является получение детализированных в физическом и вероятностном пространствах количественных оценок климатических воздействий, в том числе – для небольших регионов и в близкой временной перспективе.

3. Адаптация населения и экономики к климатическим изменениям в российской Арктике[109]

В последние годы проблема адаптации к климатическим изменениям стала одним из приоритетов повестки дня развития мирового сообщества. Эта общемировая проблема особенно актуальна для Арктики. С одной стороны, в этом макрорегионе процессы климатических изменений протекают намного быстрее и масштабнее, чем в остальной части Земного шара. Соответственно, увеличиваются и риски для устойчивости экосистем, хозяйственных комплексов и качества жизни, прежде всего здоровья, населения, обусловленные изменениями экстремальности климата и расширением зоны инфекционных заболеваний, активными процессами таяния вечной мерзлоты, абразии береговой линии, уменьшения ледяного покрова Северного Ледовитого океана и т. д.[110] С другой стороны, подавляющая часть техногенных источников и факторов ускорения климатических изменений и обусловленных ими экологических и социально-экономических последствий, находится вне Арктического региона, который (включая Арктическую зону Российской Федерации как его основную часть), таким образом, правомерно считать нетто-реципиентом климатических рисков.

Это обостряет актуальность разработки и реализации эффективных стратегий и программ адаптации к климатическим изменениям как на государственном уровне (федеральными и региональными органами власти), так и ведущими отечественными компаниями, осуществляющими хозяйственную деятельность в Арктике. Разработка таких стратегий требует системного подхода, внедрения широкого набора технологических, организационно-управленческих и институциональных инноваций. Сложность таких преобразований, в том числе необходимость эффективной координации между различными федеральными и региональными министерствами и ведомствами по интеграции адаптационных мер в их деятельность и программы развития, объективно затрудняет процесс создания региональных планов адаптации, что увеличивает среднесрочные и

[109] Раздел базируется на работе Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., 2016: Управление климатическими рисками развития российской Арктики: приоритет адаптации // *Управление риском*. № 4. ООО "Анкил". Москва. С. 39–47.

[110] Масштаб климатических изменений отмечается экспертами МГЭИК и Арктического Совета в многочисленных оценочных докладах, в том числе в докладе Arctic Council (2016): Arctic Resilience Report. M. Carson and G. Peterson (eds). Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm, December 2016. – 218 p. URL: http://www.arctic-council.org/arr

особенно долгосрочные риски социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации.

В то же время, активная разработка эффективных мер адаптации на федеральном уровне и на уровне отдельных субъектов Российской Федерации, входящих в ее Арктическую зону, помимо снижения указанных выше рисков будет содействовать интенсификации социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации и России в целом. Это связано с тем, что меры адаптации не только обеспечивают защиту и сохранение качества жизни населения, устойчивость функционирования государственных структур и бизнеса в условиях климатических изменений, но и предполагают улучшение и модернизацию систем жизнеобеспечения и инфраструктуры, внедрение передовых управленческих и организационных практик, и технологических решений, что имеет ключевое значение для динамики и качества экономического роста и укрепления безопасности, комфортности и качества жизни населения Арктической зоны Российской Федерации.

3.1 Концептуальные подходы к управлению климатическими рисками социально-экономического развития российской Арктики

Управление климатическими рисками развития включает два взаимосвязанных направления и комплекса действий.[111] Одно из них, как уже подчеркивалось выше, приоритетное для Арктического региона мира в целом и Арктической зоны Российской Федерации, в частности – это *адаптация.* Она предусматривает комплекс мер по постоянному приспособлению экономики и общества к климатическим изменениям и их последствиям, которых либо невозможно (из-за нереалистичности предотвращения природных климатических опасностей и принципиальной ограниченности знаний о глобальном климате), либо не удается избежать (вследствие ограниченной эффективности мер по снижению техногенной нагрузки на природу и климат). Другое, *превентивное,* направление ориентировано на снижение антропогенного риска изменений климата, дополнительно усугубляющего ущерб от естественных его флуктуаций, в первую очередь путем значительного сокращения техногенных выбросов парниковых газов. Основу комплекса мер, обеспечивающих указанное снижение, составляют низкоуглеродные и энергоэффективные технологии, включая

[111] Подробнее см. Порфирьев Б.Н. Экономика климатических изменений. М.: Анкил, 2008. 168 с., с. 59–60.

энергосберегающие и возобновляемые источники энергии (ВИЭ), благодаря которым в долгосрочной перспективе международное сообщество рассчитывает трансформировать существующую хозяйственную систему в мировую «зеленую» экономику.[112]

Превентивное и адаптационное направления управления климатическими рисками взаимосвязаны. Так, без соответствующих усилий и затрат на снижение техногенного риска климатических изменений возможности адаптации будут ограничены, а затраты на нее будут расти. В то же время, указанные направления существенно различаются по времени и характеру ожидаемого эффекта. Так, выгоды от мер снижения климатических рисков реализуются со значительным временным лагом (вероятно, не ранее, чем через несколько десятилетий), но в глобальном масштабе – за счет постепенной стабилизации (а в более отдаленной перспективе и сокращения) общемировых антропогенных выбросов парниковых газов с соответствующим стабилизирующим влиянием на повышение глобальной температуры и уровня моря. Выгоды же адаптации к климатическим изменениям реализуются со сравнительно небольшой задержкой и носят преимущественно локальный характер, обеспечивая защиту населения, хозяйственных комплексов и природной среды конкретных территорий, хотя конкретно в отношении Арктической зоны Российской Федерации, учитывая ее вклад в национальную экономику (порядка 30 % ВВП), вполне правомерно говорить о макроэкономическом эффекте адаптации.

Несмотря на прогресс в развитии низкоуглеродных технологий, в последние годы все чаще признается недостаточность мер снижения техногенной нагрузки на глобальный климат для недопущения его критических изменений, которые, согласно международным соглашениям, могут возникнуть при повышении глобальной температуры приземного воздуха на 2°С к уровню 1900 г. В принятом в декабре 2015 г. Парижском соглашении сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) на период с 2020 г. непревышение этого уровня определена как глобальный императив, а адаптация – впервые на уровне мирового сообщества – официально признана приоритетным направлением политики в области климата и климатических изменений на всех уровнях: международном, региональном и национальном.

[112] Подробнее см. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication, UNEP, 2011. 630 p.

3.2 Роль адаптации в системе приоритетов государственной политики развития Арктической зоны Российской Федерации

В настоящее время в России отсутствует целостная стратегия и общенациональный план адаптации к климатическим изменениям, необходимость разработки и реализации которых установлена вышеупомянутым Парижским соглашением. Тем не менее, значимость данной проблемы нашла отражение в ряде нормативно-правовых документов, в том числе в принятой в 2009 г. Климатической доктрине РФ; в которой подчеркивается необходимость адаптации к изменениям климата «для снижения потерь и использования выгод, связанных с наблюдаемыми и будущими изменениями климата».[113] Там же подчеркивается, что для разработки стратегии и планов адаптации необходимы: 1) оценки уязвимости социально-экономической системы к неблагоприятным последствиям изменений климата и рисков связанных с ними потерь; 2) оценки возможных выгод, связанных с адаптацией и благоприятными последствиями изменений климата; 3) оценки затрат, эффективности (в том числе экономической) и практической реализуемости мер адаптации; 4) оценки потенциала адаптации государства, секторов экономики, населения и отдельных социальных групп с учётом экономических, социальных и других значимых факторов.

В государственной программе «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», утвержденной Постановлением Правительства РФ 21 апреля 2014 г., в качестве одной из целей провозглашена «защита природной среды Арктики и ликвидация экологических последствий хозяйственной деятельности в условиях возрастающей экономической активности и глобальных изменений климата». Это с полным основанием позволяет рассматривать изменения климата как одну из значимых групп факторов, влияющих на долгосрочные перспективы развития Арктической зоны Российской Федерации, наряду с экономическими, социально-демографическими, экологическими и военно-политическими факторами; а саму адаптацию населения и хозяйственных систем к климатическим изменениям – в качестве одного из приоритетов и стратегических ориентиров социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации.

[113] Климатическая доктрина Российской Федерации. Утверждена Распоряжением Президента Российской Федерации от 17.12.2009 г. № 861-рп. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/6365

Конкретное содержание системы адаптационных мер существенно зависит от особенностей природно-климатических условий, социально-экономического положения и ресурсной обеспеченности конкретной территории (региона) Арктической зоны Российской Федерации. Как уже доводилось писать одному из авторов, в этом макрорегионе нет ни одной территориальной единицы, выделенной в Указе Президента РФ «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации»[114], которая не требовала бы самостоятельной целевой программы, учитывающей их специфику, и разработка которой, в то же время, осуществлялась бы на единой (с другими такими программами) методологической основе».[115] Вышеупомянутое в полной мере можно отнести и к стратегии и планам адаптации арктических территорий к климатическим изменениям.

Эти стратегии и планы должны включать следующие ключевые элементы – они же суть основные направления адаптации населения и хозяйственных систем Арктической зоны Российской Федерации к климатическим изменениям:

– защита населения от негативных последствий климатических изменений (совершенствование системы здравоохранения, помощь при чрезвычайных ситуациях, разработка систем раннего оповещения о стихийных бедствиях и погодно-климатических аномалиях и другие меры по улучшению систем жизнеобеспечения и повышения качества жизни с учетом меняющихся, в том числе под влиянием климатических изменений, условий);

– мониторинг и прогнозирование изменений погодно-климатических условий в Арктической зоне Российской Федерации, включая стихийные бедствия и погодно-климатические аномалии,

– оценка рисков и определение приоритетов (ранжирование) рисков изменений погодно-климатических условий для населения и хозяйственных комплексов Арктической зоны Российской Федерации в отраслевом и территориальном (пространственном) разрезах;

– разработка и реализация отраслевых программ адаптации, направленных на защиту и повышение устойчивости хозяйственных комплексов Арктической зоны Российской Федерации к реальным (актуальным) неблагоприятным

[114] Указ Президента РФ от 2 мая 2014 года № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации».
[115] Лексин В.Н., Порфирьев Б.Н. Государственное управление развитием Арктической зоны Российской Федерации: задачи, проблемы, решения: монография / Науч. ред. академик В.В. Ивантер – М.: Научный консультант, 2016. 194 с. (с. 32).

последствиям изменений климата (протаивание многолетних мерзлых грунтов, абразия берегов, учащение лесных пожаров и т. д.);

– разработка и реализация отраслевых программ адаптации, направленных на (а) снижение ожидаемого ущерба хозяйственных комплексов от прогнозируемых климатических изменений, включая меры по минимизации ущерба природной среде и экосистемам, связанным с интенсификацией хозяйственной деятельности в Арктической зоне Российской Федерации с учетом тенденций смягчения климата, открытия доступа к новым месторождениям полезных ископаемых, более интенсивной эксплуатации Северного морского пути и других транспортных маршрутов; (б) эффективное использование указанными комплексами благоприятных возможностей, открывающихся в результате смягчения климата;

– разработка и реализация региональных программ адаптации, направленных на обеспечение защиты населения, инфраструктуры и природных экосистем от последствий изменений климата (наводнения, пожары и другие стихийные бедствия, волны жары и холода; протаивание многолетних мерзлых грунтов, абразия береговых зон и т. д.);

– разработка и реализация образовательных и научных программ, обеспечивающих развитие базы данных и базы знаний в области географии, экологии, климата и социально-экономических процессов в Арктической зоне Российской Федерации с целью повышения качества прогнозирования, оценки рисков и эффективности адаптационных мер в рамках стратегического планирования развития данного макрорегиона.

При формировании государственных стратегий адаптации следует учитывать, что международная, государственная и корпоративная политика адаптации к климатическим изменениям является важным элементом общей долгосрочной стратегии перехода мирового хозяйства на путь устойчивого развития. В этом контексте меры по адаптации Арктической зоны Российской Федерации к указанным рискам должны рассматриваться и оцениваться, в том числе, с точки зрения возможностей повышения экологической и социально-экономической устойчивости, а также модернизации развития, которые они открывают для российского общества в долгосрочной перспективе.

К таким благоприятным возможностям можно отнести: 1) развитие фундаментальной науки и прикладных НИОКР, направленное на углубление знаний о географии, экологии, климате и социально-экономических процессах в

российской Арктике; 2) качественные улучшения в эффективности природопользования, особенно лесов; а также добычи природных и биоресурсов при минимизации ущерба для сухопутных, морских и речных экосистем региона; 3) переход к новым, более высоким, стандартам комфортности проживания и качества жизни населения Арктической зоны Российской Федерации за счет модернизации и диверсификации энергетической, транспортной и коммунальной инфраструктуры региона, особенно в крупных городах; 4) переход к новому качеству национальной политики (на федеральном и региональном уровне), направленной на обеспечение защиты и повышения качества жизни коренных малочисленных народов Севера; 5) освоение ведущими российскими компаниями технологических и управленческих компетенций мирового уровня в области экологических инноваций, стратегий корпоративной социальной ответственности за счет интеграции адаптационных механизмов в свои стратегии развития, в первую очередь, добычи и переработки природных ресурсов и ископаемого топлива.

Представляется, что при использовании указанных возможностей российское государство и ведущие российские компании приобретут ценнейший опыт, который в будущем может быть востребован другими странами, заинтересованными в хозяйственном освоении Арктики. В частности, разработка строительных технологий и материалов, организационно-управленческие услуги по проектированию систем жизнеобеспечения в Арктике в перспективе могут быть востребованы как одно из направлений экспорта высокотехнологичной продукции и услуг.

Остановимся подробнее на некоторых из перечисленных выше направлений и групп мер по адаптации Арктической зоны Российской Федерации к климатическим изменениям.

3.3 Защита населения и территорий Арктической зоны Российской Федерации в рамках адаптации к климатическим изменениям

Климатические изменения и их экологические последствия оказывают влияние на здоровье жителей арктических городов и на коренное население Арктической зоны Российской Федерации.[116] Они становятся причиной дополнительной смертности (в результате волн жары и холода); повышения

[116] Подробнее см.: Ревич Б.А., Терентьев Н.Е., 2015: Оценка влияния климатических изменений на здоровье населения европейской части российской Арктики // *Управление риском*. № 4. С. 35–42.

заболеваемости инфекционными болезнями (как по причине изменений ареалов обитания возбудителей инфекций, так и, например, в результате инфицирования воды из-за повреждения водопроводно-канализационных и других санитарно-технических сооружений). Климатические изменения оказывают негативное влияние на состояние здоровья и комфортность жизни коренных малочисленных народов Севера по причинам ухудшения условий охоты и рыбного промысла, роста числа травм, например, из-за более раннего вскрытия морского льда. Кроме того, климатические изменения наряду с непосредственным влиянием, усиливают кумулятивный эффект ряда прочих (в том числе антропогенных) негативных воздействий, особенно, загрязнения воздуха в арктических городах.

Основные меры по защите населения включают: (1) совершенствование систем и инструментов оказания помощи людям, пострадавшим от стихийных бедствий, вызванных климатическими изменениями; (2) развитие систем раннего предупреждения населения об ожидаемых стихийных бедствиях и погодно-климатических аномалиях и проведение образовательной работы по безопасному поведению людей в условиях таких чрезвычайных ситуаций; (3) развитие системы здравоохранения, направленное на усиление эпидемиологического надзора, а также на повышение качества и своевременности диагностики и лечения заболеваний, прямо или косвенно обусловленных климатическими изменениями (инфекционных заболеваний, тепловых ударов и т. д.); (4) программы совершенствования трудового законодательства и стандартов в области охраны труда с целью повышения обеспеченности населения системами кондиционирования и другими средствами, улучшающими комфортность труда в условиях экстремальных температурных режимов (в том числе, волн жары и холода).

До сих пор отсутствуют целостные стратегии по адаптации и защите населения на территориях Арктической зоны Российской Федерации от последствий климатических изменений, хотя попытки разработки таких документов предпринимались. В частности, отметим проект «Стратегии адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и НАО Российской Федерации», разработанной в 2011 г. в Архангельске. Указанная стратегия направлена на адаптацию системы здравоохранения Архангельской области и НАО, улучшение межведомственного взаимодействия, а также образовательной и информационной работы по смягчению негативных последствий волн жары и холода, других погодно-

климатических аномалий для здоровья людей.[117] Меры, предложенные в указанной стратегии, в частности, включают изменение в период экстремальных температур графика работы лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ); улучшение материальной и методической базы учреждений здравоохранения, особенно в сельской местности; более качественное информирование населения об ожидаемых температурных аномалиях, в том числе с использованием телеканалов и радиоканалов; совершенствование системы сбора и регистрации информации о состоянии здоровья населения, включая основные и новые факторы риска, возникающие в связи с климатическими изменениями.[118]

Что касается защиты территорий Арктической зоны Российской Федерации, эта задача еще более методически и практически сложна, учитывая высокое разнообразие климатических угроз, а также масштабы трудовых и финансовых затрат на проведение соответствующих мероприятий по адаптации. Наиболее значимые направления адаптации по защите территорий, на наш взгляд, включают две группы мер. Во-первых, меры по защите поселений (жилого фонда и коммунальной инфраструктуры), предусматривающие регулярный мониторинг состояния объектов, и условий окружающей среды (например, темпов протаивания многолетних мерзлых грунтов) для оценки рисков их повреждений и принятие мер по укреплению фундаментов зданий. Особенное внимание следует уделять поселениям вблизи береговой зоны, подверженным повышенным рискам из-за абразии. Во-вторых, меры по защите инфраструктуры, предусматривающие регулярный мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры (железнодорожных и автомобильных дорог), коммунальных сетей, трубопроводов и т.д. с целью недопущения ущербов (особенно крупных) от техногенных аварий, вызванных выходом данных объектов из строя. Представляется, что в качестве элемента упреждающей адаптации следует рассматривать также анализ климатических рисков на этапе планирования новых производств, строительства новых транспортных путей. Расходы на мониторинг состояния и ликвидацию негативных последствий климатических изменений должны быть включены в совокупные эксплуатационные затраты будущих инвестиционных проектов.

---

[117] Стратегия адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и НАО Российской Федерации. Архангельск, 2012. 100 с. С. 13. URL:http://www.nsmu.ru/science/nii_pol_med/Izenenie_climata/Strategiya.nsmu.pdf (с.13).

[118] Стратегия адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и НАО Российской Федерации. Архангельск, 2012. 100 с. С. 13. URL:http://www.nsmu.ru/science/nii_pol_med/Izenenie_climata/Strategiya.nsmu.pdf (с.20).

Отдельным перспективным видом адаптации территорий Арктической зоны Российской Федерации к изменениям климата и их последствиям являются меры, включая инвестиции, по сохранению уникальных природных экосистем и биологического разнообразия Арктики, в том числе лесов. На современном этапе основные усилия, очевидно, должны быть сосредоточены на недопущении (минимизации ущербов) от антропогенного загрязнения окружающей среды и экосистем Арктической зоны Российской Федерации, усиленных климатическими изменениями.

3.4 Особенности и перспективы адаптации строительного сектора Арктической зоны Российской Федерации к климатическим изменениям[119]

Разработка адаптационной стратегии и соответствующего комплекса мер в строительстве имеет особую актуальность и значимость, учитывая всеохватность строительного комплекса (имея в виду сферы экономики и территории, где ведутся строительные работы) и длительный период эксплуатации сооружаемых объектов (жилые и производственные здания, инфраструктуры и т. д.). Эти меры должны обеспечивать нормативно заданные условия микроклимата внутри зданий, надежность и долговечность сооружений, оптимизацию затрат энергии на отопление и вентиляцию помещений (энергоэффективность) с учетом объективных ограничений на финансовые и людские ресурсы, а также происходящих и ожидаемых региональных изменений климата. Существующие здания, построенные многие десятилетия тому назад, проектировались на основе климатических параметров, характеризующих условия середины прошлого века, и в настоящее время далеко не всегда соответствуют перечисленным требованиям. В условиях отмеченного выше характерного для изменений климата в Арктике роста экстремальных атмосферных нагрузок на здания и сооружения (не говоря уже о неполном соблюдении регламентов их эксплуатации) многие конструкции функционируют только за счет запасов прочности, что влечет за собой высокую вероятность разрушений и аварий. При проектировании новых зданий и сооружений в Арктической зоне Российской Федерации необходимо использовать обновленные нормы строительного проектирования, которые учитывают нестационарность и усиливающуюся экстремальность климатического режима.

[119] Подробнее см.: Порфирьев Б.Н., Хлебникова Е.И., 2015: Строительство в условиях изменений климата в Арктике: риски и возможности их снижения // *Экономика строительства*. № 6. С. 4–15.

В частности, речь идет о стандартах строительства, касающихся ветровых нагрузок. В Стандарте организации (СТО)[120], введенном в действие в 2009 г., и последующей актуализированной версии СНиП районирование территории Российской Федерации осуществлено на основе значений скорости ветра, соответствующих повторяемости установленного уровня 1 раз в 50 лет. При проектировании объектов, для которых необходимо обеспечить высокую степень надежности и безопасности, расчетная ветровая нагрузка определяется по значениям скорости ветра, соответствующим периоду повторяемости в 10 тыс. лет. Это означает, что при проектировании сооружения задается вероятность непревышения расчетной скорости ветра в течение 100 лет, равная 0,99.

Такой норматив представляется вполне обоснованным, принимая во внимание, с одной стороны, перечисленные ранее негативные последствия растущих ветровых нагрузок в Арктике для устойчивости конструкций и теплообеспеченности зданий; с другой стороны, интенсификацию процесса переосвоения этого важнейшего для России региона, включая строительство военно-инженерных объектов, а также 10 аварийно-спасательных центров МЧС России в населенных пунктах на побережье Северного Ледовитого океана с центром управления в Дудинке.

Широкие дискуссии среди специалистов вызывает вопрос о нормировании снеговой нагрузки на различные покрытия, которая рассчитывается как произведение снеговой нагрузки на горизонтальную поверхность, умноженную на коэффициент, зависящий от технических параметров покрытия. За последние десятилетия расчетные значения этого вида нагрузок неоднократно изменялись в сторону повышения[121], что было связано с неудачным опытом эксплуатации конструкций, рассчитанных по предыдущим изданиям СНиП (в частности, транспортной галереи Архангельска, Бокситогорского глиноземного комбината и др.). В действующем стандарте нормативные снеговые нагрузки увеличены (детализированы и ужесточены требования к введению уменьшающих коэффициентов; районирование территории осуществлено не по средним значениям ежегодных максимумов, а по значениям нагрузок, возможных один раз в 25 лет). Однако и при таких повышенных нормативных значениях сохраняется

[120] Стандарт организации СТО 36554501-015-2008 «Нагрузки и воздействия». М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. 52 с.
[121] СП 20.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» М. 2011.

достаточно высокий риск их превышения в течение расчетного периода эксплуатации. Особенности происходящих и ожидаемых изменений климата приводят к увеличению вероятности экстремально высоких нагрузок и являются дополнительным фактором риска.

В действующих стандартах декларируется гармонизация с основными требованиями международных норм, но это касается, в основном, лишь используемой системы обозначений и формы представления нагрузок. В настоящее время на завершающей стадии находится процесс разработки национального приложения к Еврокоду, учитывающему – наряду с учетом обязательных требований по безопасности строительного проектирования – особенности формирования атмосферных нагрузок на территории России. В условиях увеличения вероятности экстремально высоких снеговых нагрузок при проектировании ответственных сооружений (например, большепролетных зданий социального назначения) целесообразно устанавливать нормативные снеговые нагрузки на основе принятия достаточно высокой вероятности их непревышения в течение всего расчетного периода эксплуатации.[122]

С целью обеспечения долговечности зданий и сооружений при возведении новых объектов целесообразно предусмотреть использование новых конструкционных материалов, которые должны отличаться повышенной надежностью и долговечностью. В настоящее время большая часть выпускаемой отечественной промышленностью продукции официально относится к категориям У (умеренный климат) или УХЛ (умеренно-холодный климат, нижний температурный предел -40°С), тогда как северные нормативы, несмотря на тенденцию потепления климата, требуют соблюдения температурного предела до -60°С. В то же время, указанная тенденция диктует необходимость в стандартах и самих конструкционных материалах, рассчитанных на большее число циклов замораживания и оттаивания, повышенную коррозийную устойчивость различных элементов, а также конструктивные решения, направленные на уменьшение возможности промачивания стен (соответствующие стыки панельных зданий, ориентация здания, козырьки над входами и др.).[123]

[122] Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Под ред. В.М. Катцова и Б.Н. Порфирьева. М., Д'АРТ, 2011. 252 с. (с. 107, 148).

[123] Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Под ред. В.М. Катцова и Б.Н. Порфирьева. М., Д'АРТ, 2011. 252 с. (с. 147).

Помимо обеспечения безопасности строительных объектов в течение всего расчетного периода их эксплуатации с учетом особенностей климатических изменений важнейшим требованием является повышение их энергоэффективности. Реализация этого требования предполагает не столько энергосбережение, выдвигающее на первый план задачу сокращения потребления энергии – ее осуществление «в чистом виде» означало бы риск снижения комфортности условий жизнедеятельности, что неприемлемо, особенно в условиях Арктики – сколько повышение энергопроизводительности. Последняя предполагает рост производства или улучшение качества услуг (включая комфортность среды проживания и рабочей среды) в расчете на единицу затрат энергии и приоритетна для развития реального сектора экономики, особенно в условиях спада производства или стагнации, характерных для российской экономики в целом и Арктической зоны Российской Федерации в частности в последние годы и, вероятно, в 2017-2018 гг. Использование в качестве одного из целевых критериев развития повышение энергопроизводительности (или энергоотдачи) обеспечивает тройной выигрыш: наряду с рациональным использованием энергоресурсов и снижением в связи с этим дополнительных издержек достигается рост выпуска продукции и улучшение социальных условий жителей Арктической зоны Российской Федерации.

Учитывая это, несмотря на тенденцию повышения зимних температур, представляется недопустимым снижение требований к тепловой защите зданий. Напротив, целесообразно ужесточение нормативов теплозащитных свойств зданий, учитывающих при проектировании расчетные параметры температуры воздуха, соответствующие более высокому уровню теплообеспеченности и предполагающие использование современных систем автоматического регулирования подачи тепла. Введение в 2003 г. СНиП «Тепловая защита зданий» в качестве целевой задачи проектирования тепловой защиты определило минимизацию расхода энергии на поддержание требуемых параметров микроклимата и комфортности зданий для проживающих и работающих там людей. В 2013 г. введена в действие актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», призванная повысить энергоэффективность проектируемых зданий благодаря гармонизации действующих российских требований с зарубежными нормами проектирования. Однако практика показывает, что сохраняются серьезные проблемы, решение которых требует более оперативной корректировки нормативных и справочных

документов, а также учета прогнозов изменения климатических и экономических факторов.[124]

3.5 Корпоративные стратегии адаптации бизнеса к климатическим изменениям: возможности для социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации

Проблема адаптации к климатическим изменениям и их последствиям становится все более актуальной для ведущих мировых компаний. Согласно опросу таких компаний, проведенному BSR в 2015 г., около 19 % респондентов интегрировали климатические риски в свои системы риск менеджмента, еще около 30% оценивают возможности включения в эти системы отдельных, наиболее актуальных для их бизнеса, видов указанных рисков.[125] При этом около 30% опрошенных компаний отметили, что климатические изменения уже оказывают ощутимое влияние на их деятельность.[126]

По мере трансформации крупнейших ТНК в глобальные компании, выстраивающие общемировые цепи поставок и сбыта продукции, укрепляющие свой доступ к мировым рынкам капитала, природных ресурсов, кадров и технологий, расширяется сфера их бизнеса, включая размещение производств в регионах с различными природно-климатическими условиями, в том числе в регионах, подверженных высоким рискам климатических изменений, особенно в Арктике.

Так же как и на макроэкономическом уровне, стратегии бизнеса по управлению климатическими рисками включают, с одной стороны, меры по снижению их хозяйственной нагрузки на природную среду и климат, что достигается за счет обновления их производственной инфраструктуры, постепенного перехода к использованию низкоуглеродных энергетических источников энергии, транспортных средств и т.д. С другой стороны, комплекс мер адаптации, предусматривающий повышение устойчивости корпоративных бизнес-процессов к ожидаемым климатическим изменениям. Особенностью корпоративного сектора экономики Арктической зоны Российской Федерации

---

[124] Хлебникова Е.И., Дацюк Т.А., Салль И.А., 2014: Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 574. С. 125–178 (130–131).

[125] 2015 Corporate adaptation survey: Four Twenty Seven and Notre Dame Global Adaptation Index with support from BSR. May 2015. – 27 p. (p. 13).

[126] 2015 Corporate adaptation survey: Four Twenty Seven and Notre Dame Global Adaptation Index with support from BSR. May 2015. – 27 p. (p. 22).

является доминирование в его структуре компаний, занятых добычей и переработкой природных ресурсов суши и акватории, а также транспортного обеспечения данной деятельности.[127] В целом наблюдаемые и ожидаемые климатические изменения будут способствовать интенсификации хозяйственной деятельности (благодаря смягчению климата). В то же время, как отмечалось выше, потепление будет усиливать темпы протаивания многолетних мерзлых грунтов, тем самым, увеличивая корпоративные ущербы от техногенных аварий и связанного с ними загрязнения окружающей среды.

В целом, представляется, что наибольший эффект от стратегий адаптации в Арктической зоне Российской Федерации может быть достигнут при взаимной согласованности интересов государства, бизнеса и общества и органичной интеграции корпоративных арктических проектов с общей программой и стратегией комплексного социально-экономического развития российской Арктики.

[127] Север и Арктика в новой парадигме мирового развития: актуальные проблемы, тенденции, перспективы. Научно-аналитический доклад / Под ред. В.С. Селина, Т.П. Скуфьиной, Е.П. Башмаковой, Е.Е. Торопушиной. – Апатиты, КНЦ РАН, 2016. – 420 с. (с. 29-31).

4. Арктика в контексте гранд-вызовов, стоящих перед климатической наукой[128]

4.1 Гранд-вызовы Всемирной программы исследований климата

В течение нескольких последних лет Всемирная программа исследований климата (ВПИК)[129], поддерживаемая совместно Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Международным советом по науке (МСН)[130] и Межправительственной океанографической комиссией (МОК)[131] ЮНЕСКО, на основе многочисленных консультаций и широкой дискуссии в международном научном сообществе – в дополнение к своей регулярной многолетней деятельности в форме рабочих групп и проектов – сформулировала ряд так называемых «гранд-вызовов»[132], стоящих перед климатической наукой. Под гранд-вызовом понимается крупная научная проблема, представляющая собой не преодоленный на сегодняшний день специфический барьер, препятствующий прогрессу в критически важной области современной климатической науки. Гранд-вызов предполагает достаточно высокую вероятность достижения существенного прогресса в результате соответствующих целенаправленных исследований в ближайшие 5-10 лет, а также возможность применения эффективных показателей для оценки результативности проводимых исследований. Решению проблемы способствуют привлечение лидеров мировой науки в соответствующей области, создание новаторских сообществ и усиление сотрудничества, в том числе международного. Немаловажными полагаются и наличие интереса к гранд-вызову со стороны СМИ и общественности, а также способность ученых, работающих над решением проблемы поддерживать этот интерес.

Число гранд-вызовов ВПИК не фиксировано. В настоящее время ВПИК организует работу над пятью гранд-вызовами:

- Облака, циркуляция и чувствительность климата;
- Тающий лед и глобальные последствия;
- Экстремальные климатические явления;

[128] Раздел базируется на работе: Катцов, В.М., Т.В. Павлова, 2015: Арктика в контексте «гранд-вызовов» климатической науке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 579. С. 66–78.
[129] англ. World Climate Research Programme, WCRP
[130] англ. International Council for Science, ICSU
[131] англ. Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC
[132] от англ. «grand challenge»

- Региональные изменения уровня моря и их воздействия на прибрежные зоны;
- Изменения (в доступности) водных ресурсов.

В стадии обсуждения остаются еще два потенциальных гранд-вызова ВПИК, связанных с биогеохимическими циклами, а также десятилетней (внутривековой) предсказуемостью.

Очевидно, значение отдельных гранд-вызовов, с точки зрения изменения климата в тех или иных регионах, неодинаково. В этом контексте Арктика выделяется на фоне других регионов планеты. Арктика является одним из наиболее уязвимых к изменению климата регионов. В то же время, происходящие и, в еще большей степени, ожидаемые воздействия изменений климата на природную среду Арктики, велики и, в отличие от многих других регионов планеты, способны оказывать значительные обратные воздействия на глобальный климат, что означает глобальную значимость климатических изменений в Арктике.[133] Это определяет особое место Арктики в контексте гранд-вызовов ВПИК, хотя, разумеется, центральную роль этот регион играет в гранд-вызове «Тающий лед – глобальные последствия».

Описание гранд-вызовов ВПИК существует в виде так называемых «белых» (дискуссионных) статей, очень кратко изложенных в следующем разделе.

Облака, циркуляция и чувствительность климата[134]

Облака остаются важнейшим источником неопределенности в оценках чувствительности климатической системы к росту содержания парниковых газов в атмосфере. Неопределенность этих оценок практически не изменилась за последние три с половиной десятка лет.[135] Кроме того, облака вносят существенный вклад в погрешности воспроизведения крупномасштабной атмосферной циркуляции с помощью климатических моделей, а это, в свою очередь ведет к погрешностям географического распределения, частоты и интенсивности осадков. Указанные погрешности приводят к значительным межмодельным расхождениям в оценках будущих изменений климата. Улучшение

[133] Катцов В.М., Порфирьев Б. Н., 2012: Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // *Арктика: экология и экономика*. № 2 (6). С. 66–79.
[134] Bony, S., B. Stevens, 2012: Clouds, Circulation and Climate Sensitivity: How the interactions between clouds, greenhouse gases and aerosols affect temperature and precipitation in a changing climate. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/gc-clouds
[135] Спорышев П.В., Катцов В.М., Мелешко В.П., Алексеев Г.В., Кароль И.Л., Мирвис В.М., 2014: Причины наблюдаемых изменений климата // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 574. С. 39–124.

понимания взаимосвязи между адиабатическими и неадиабатическими процессами в атмосфере и роли облаков в этой взаимосвязи должно способствовать уточнению оценок будущих изменений температуры, осадков и циркуляции и необходимо для улучшения возможностей климатических моделей и моделей прогноза погоды на всех временных и пространственных масштабах.

В качестве главных барьеров, препятствующих прогрессу в оценке чувствительности климата и будущих изменений осадков, определены:

- сохраняющаяся неспособность уменьшить неопределенность влияния облаков на чувствительность климата;
- недостаточное понимание региональных изменений циркуляции и осадков, особенно над сушей;
- не вызывающие достаточного доверия модельные описания взаимодействия между процессами формирования облаков и крупномасштабной динамикой.

Тающий лед и глобальные последствия[136]

Криосфера Земли, состоящая из ледников и ледниковых щитов, снега, многолетней мерзлоты, морского льда и некоторых других компонентов, сокращается при потеплении климата. Между тем, это сокращение, сопровождающееся важными, в том числе – социально значимыми глобальными эффектами, характеризуется большими неопределенностями его пространственно-временных перспективных оценок.[137] Ключевыми проблемами, сформулированными для этого гранд-вызова, являются:

- прогнозы и перспективные оценки полярного климата в широком диапазоне масштабов – от сезона до столетия, а также роль криосферы в предсказуемости климата;

[136] Kattsov, V, G. Flato, S. Bony, S. Gille, B. Kirtman, V. Ryabinin, A. Scaife, K. Trenberth (2012) Cryosphere in a changing climate: A grand challenge of climate science. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_cryo.pdf; Flato G., V.Kattsov, J.Baeseman (2015) Melting Ice – Global Consequences. Initial implementation plan for the WCRP Grand Challenge on the Cryosphere in a Changing Climate. http://www.wcrp-climate.org/GRAND%20CHALLENGES/Melting%20Ice/documents/Melting_Ice_Global_Consequences_20_Mar_2015-2.pdf

[137] Под перспективными оценками (изменений) климата здесь понимаются оценки возможных в будущем изменений в результате реализации того или иного сценария внешнего воздействия на климатическую систему. Перспективная оценка является, таким образом, «условным» прогнозом, поскольку вероятность реализации сценария не определена. Такие оценки в англоязычной литературе обозначается термином «projection», не имеющим, на наш взгляд, прямого эквивалента в русском языке. Используемый иногда в качестве перевода термин «проекция» не представляется удачным.

- установление причин модельных погрешностей, относящихся к криосфере;
- улучшение модельных описаний многолетней мерзлоты и поверхности суши в высоких широтах с особым вниманием к их роли в глобальном углеродном цикле;
- развитие моделирования ледниковых щитов с особым вниманием к роли их динамики, с точки зрения ускорения подъема уровня Мирового океана.

Объединяющим, центральным вопросом для указанного гранд-вызова является скорость ожидаемых изменений криосферы и интенсивность обратного воздействия сокращающейся криосферы на другие компоненты глобальной климатической системы.

Экстремальные климатические явления[138]

Статистические характеристики экстремальных погодно-климатических явлений меняются вместе с климатом. Поскольку экстремальные явления оказывают воздействие практически на любой аспект жизнедеятельности общества, растет запрос на надежные прогнозы и перспективные оценки экстремальных явлений от нескольких часов до сезона и далее – до столетий. Удовлетворению этого запроса препятствуют как фундаментальные научные проблемы, так и недостаточные качество и количество данных наблюдений, используемых для мониторинга и исследования экстремальных явлений. К числу неотложных вопросов, стоящих перед научным сообществом, относятся следующие:

- Как улучшить сопоставление, распространение и качество данных наблюдений, необходимых для оценки экстремальных явлений, и какие новые виды наблюдений нужны?
- Каковы механизмы взаимодействия между крупномасштабными внешними факторами и обратными связями поверхности суши регионального масштаба, которые оказывают влияние на экстремальные явления, и как можно улучшить представление этих процессов в моделях?

[138] Zhang, X., G. Hegerl, S. Seneviratne, R. Stewart, F. Zwiers, L. Alexander (2012) WCRP Grand Challenge: Understanding and Predicting Weather and Climate Extremes. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_Extremes_v2.pdf

- В какой мере выявленные изменения экстремальных явлений могут быть отнесены за счет внешнего по отношению к климатической системе воздействия и/или внутренних факторов, таких как моды изменчивости?
- Какие факторы повысили риск того или иного наблюдавшегося события?
- Предсказуемы ли изменения частоты и интенсивности экстремальных явлений на временных масштабах от сезона до десятилетия, и если предсказуемы, как реализовать потенциал предсказуемости и как наилучшим образом использовать такие прогнозы?
- Как крупномасштабные явления, такие как муссоны и моды изменчивости, изменятся в будущем, и как это повлияет на экстремальные явления?

и некоторые другие.

Региональные изменения уровня моря и их воздействия на прибрежные зоны[139]

Проблемы, образующие этот гранд-вызов, относятся ко всем составляющим изменений уровня океана – от глобальных до локальных. Эти проблемы связаны как с анализом данных наблюдений и моделирования изменений климата, включая экстремальные явления, так и оценкой потенциальных воздействий этих изменений, в том числе воздействий изменений уровня моря в береговых зонах.

К основным задачам этого гранд-вызова относятся:

- уменьшение неопределенности моделей твердой среды Земли и гравитации, используемых в прогнозах и перспективных оценках;
- оценка относительного вклада отдельных мод изменчивости климатической системы в изменчивость уровня моря;
- разделение климатических мод и долгопериодных трендов (как в моделях, так и наблюдениях);
- анализ косвенных данных и данных о приливах; понимание вклада внутривековой изменчивости в наблюдениях и прогнозах высоты уровня моря;

[139] *Stammer, D., G. Asrar, K. Steffen* (2012) Sea-Level Rise and Regional Impacts. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC-regional_sealevel_draft.pdf

- исследование вкладов изменений ветрового воздействия по отношению к другим компонентам внешнего воздействия на региональную изменчивость уровня моря и вековые изменения;
- исследование воздействия волнения на уровень моря;
- усиление исследований вклада таяния полярных льдов, в том числе с использованием палео-данных;
- дальнейшее изучение статических откликов и воздействий на динамику ледниковых щитов;
- изучение динамического отклика уровня моря на климатическое воздействие, включая воздействие пресной воды в высоких широтах

и некоторые другие.

Изменения (в доступности) водных ресурсов[140]

Потребности в водных ресурсах, растущие в связи с ростом населения и экономическим развитием, в условиях загрязнения и чрезмерного водопотребления, приводят к борьбе за воду на локальном, региональном и международном уровнях. Антропогенные воздействия меняют состояние водосборных бассейнов и рек, подземных источников. Широкомасштабные изменения землепользования, связанные с ростом населения, урбанизацией, развитием сельского хозяйства, индустриализацией, водным регулированием меняют гидрологические системы сложным образом, в том числе изменяя сток пресной воды с суши в моря и океаны. Накладывающиеся на эти воздействия изменчивость и ожидаемые изменения климата способны создать экстремальные и, возможно, беспрецедентные условия с далеко идущими последствиями для населения, экономики и инфраструктуры многих регионов.

Важнейшими вопросами, стоящими перед научным сообществом в этой области, являются следующие:

- Насколько хорошо осадки могут быть описаны различными наблюдательными системами, и какие недостатки измерений и модельные допущения обусловливают неопределенности на различных пространственных и временных масштабах?

[140] *Trenberth, K., P. Yanda, H. le Treut, GEWEX, CLIVAR, WGCM, WGSIP* (2012) WCRP Grand Challenge: Changes in Water Availability. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_gsq_water_v5.pdf

- Как изменения климата влияют на характеристики (пространственное распределение, количество, интенсивность, частоту, продолжительность, вид) осадков – особенно, на экстремальные засухи и наводнения?
- Насколько модели становятся лучше, и насколько мы доверяем глобальным и региональным прогнозам и перспективным оценкам осадков?
- Как изменения поверхности суши и гидрологических процессов влияли в прошлом и будут влиять на доступность воды и «водную безопасность»?
- Как изменения климата влияют на экосистемы суши, гидрологические процессы, водные ресурсы и качество воды?
- Как новые наблюдения могут способствовать улучшению водного регулирования?
- Как улучшение климатических моделей может улучшить водное регулирование?

4.2 Ожидаемые климатические изменения в Арктике: открытые вопросы

Глобальное географическое распределение ожидаемых изменений температуры качественно не меняется на протяжении всей истории применения глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана для разнообразных сценариев антропогенного воздействия, ключевая роль в которых отводится выбросам парниковых газов в атмосферу. Эта картина, с присущими ей более сильным потеплением суши, по сравнению с океаном, а также максимальным потеплением в Арктике, сохраняется на протяжении четверти века оценочной деятельности МГЭИК, в том числе – и в самых последних расчетах – для новых сценариев эмиссий и новых моделей CMIP5, которые были использованы в вышеупомянутом 5-м оценочном докладе МГЭИК.[141]

Сокращение площади морского льда и снежного покрова суши, деградация многолетней мерзлоты, относительный рост осадков в Арктике также относятся к

[141] Катцов, В.М., Т.В. Павлова, 2015: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 579. С. 7–21.

устойчивым результатам моделирования реакции глобальной климатической системы на рост содержания парниковых газов в атмосфере.[142]

Между тем, значительное количество вопросов относительно будущих изменений климата Арктики и их возможного влияния на климат за пределами высоких широт Северного полушария остаются открытыми. Эти вопросы, по большей части, связаны с количественными оценками, в том числе – с уточнением скорости тех или иных ожидаемых изменений. К таким вопросам, очевидно, следует отнести следующие:

- Перспектива освобождения Северного Ледовитого океана от многолетнего морского льда: *как скоро ледяной покров океана станет существенно сезонным?*
- Сила положительных обратных связей между теплеющим климатом и естественными выбросами парниковых газов многолетнемерзлыми грунтами: *как скоро и в каком количестве углерод, заключенный в деградирующей многолетней мерзлоте, может попасть в атмосферу, и насколько это усилит положительную обратную связь между потеплением климата и таянием мерзлоты?*
- Последствия изменения пресноводного бюджета Северного Ледовитого океана для глобальной термохалинной циркуляции: *как скоро и насколько существенно может повлиять увеличивающийся экспорт пресной воды из Арктики на образование глубинных вод в северной части Северной Атлантики и как это повлияет на меридиональный перенос тепла океаном в Северной Атлантике?*
- Роль динамических процессов в ускорении таяния ледниковых щитов: *приведет ли учет динамики ледниковых щитов к существенному ускорению таяния, например, Гренландского ледникового щита в климатических моделях в условиях дальнейшего глобального потепления?*

[142] См., например: Павлова Т.В., Катцов В.М., Говоркова В.А., 2011: Морской лед в моделях CMIP5: ближе к реальности? // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 564. С. 7–18; Павлова Т. В., Катцов В. М., 2013: Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 568. С. 7–25; Павлова Т. В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П.В., Говоркова В. А., 2013: Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 569. С. 38–61; Павлова Т.В., В. М. Катцов, 2015: Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 579. С. 22–36.

- Влияние потепления Арктики на статистику экстремальных погодных явлений в Северном полушарии: *в какой степени недавние и ожидаемые в будущем аномальные волны тепла и холода, крупномасштабные наводнения и засухи могут быть связаны с потеплением Арктики?*
- И, наконец, предсказуемость полярного климата на временных масштабах от сезона до десятилетия – особенно сложная научная проблема, если учесть сильную собственную изменчивость климата высоких широт, – *в какой степени она зависит от изменения криосферы?*

Достаточно очевидна связь перечисленных вопросов, список которых не претендует на полноту, с гранд-вызовами ВПИК – разумеется, в первую очередь, с гранд-вызовом «Тающий лед и глобальные последствия», для которого некоторые из этих вопросов являются центральными. Хотя Арктика не всегда даже упоминается в описаниях других гранд-вызовов, достаточно ясно, что преодоление этих вызовов в той или иной степени связано с получением ответов на вышеперечисленные и некоторые другие открытые «арктические» вопросы.

4.3 Некоторые проблемы использования климатических данных в практических приложениях

Несмотря на впечатляющие достижения климатической науки на протяжении последней четверти века, зафиксированные в оценочных докладах МГЭИК, а также в других региональных и национальных оценочных докладах, наше понимание механизмов изменения климата все еще страдает существенными пробелами. Эти пробелы в существенной мере влияют на достоверность прогнозов и перспективных оценок изменения климата. Значительный вклад в неопределенности оценок климатических изменений вносит Арктический регион, который, так или иначе, попадает в фокус сформулированных ВПИК современных гранд-вызовов климатической науки.

В предыдущих параграфах этой главы были затронуты фундаментальные проблемы науки о климате. Однако представляется уместным упомянуть и некоторые прикладные задачи, которые, разумеется, относятся ко всей глобальной климатической системе, но приобретают особенную остроту в Арктике и представляют собой широкое поле для дальнейших исследований.

Важнейшей проблемой является использование результатов расчетов с помощью климатических моделей в практических приложениях (с учетом межмодельных расхождений перспективных оценок климатических изменений в Арктике и интенсивной собственной изменчивости климата в высоких широтах). Следует понимать, что модельные оценки могут быть бесполезными или даже дезориентирующими, если используются неправильно.

Научные проблемы использования модельных расчетов в исследованиях климатических воздействий и оценках климатических рисков включают подходы к дискриминации моделей; надлежащее использование модельных ансамблей и интерпретацию соответствующих вероятностей и неопределенностей; «добавленное качество» и «добавленные неопределенности», связанные с использованием различных технологий пространственной детализации результатов моделирования климатической системы; различную степень доверия к оценкам будущих изменений различных климатических характеристик (например, температуры и осадков); др.[143].

Арктика выделена в особое – одно из четырех так называемых кросс-магистральных направлений российского «Комплексного плана научных исследований погоды и климата»[144]. Гранд-вызовы ВПИК, как и специфические арктические проблемы науки о климате, упомянутые выше, легко могут найти свое место в структуре этого плана. Является ли это достаточной предпосылкой того, что российская наука внесет свой ощутимый вклад в преодоление гранд-вызовов ВПИК в «арктическом аспекте», покажет будущее.

[143] См., например: Павлова Т.В., Катцов В. М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надёжина Е. Д., 2014: Новое поколение климатических моделей // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* Вып. 575. С. 5–64.

[144] http://cc.voeikovmgo.ru/ru/dokumenty/kompleksnyj-plan-nauchnykh-issledovanij-pogody-i-klimata См. также: Катцов В.М., Н.В. Кобышева, В.П. Мелешко, Б.Н. Порфирьев, Б.А. Ревич, О.Д. Сиротенко, В.В. Стадник, Е.И. Хлебникова, С.С. Чичерин, А.Л. Шалыгин, 2011: Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Катцов В.М. и Б.Н. Порфирьев, ред. Росгидромет, 251 с.

Заключение

После очевидного успеха оценочных докладов МГЭИК, который достиг апогея в 2007 г., когда МГЭИК получила Нобелевскую премию мира, некоторые политические и общественные деятели поспешно заключили, что климатическая наука, в основном, выполнила свои задачи, так что остается лишь уточнить некоторые детали, уже не столь важные для процесса принятия решений. На самом деле, профессиональное научное сообщество признает, что современное понимание механизмов климатических изменений еще страдает существенными пробелами, связанными с недостатком данных наблюдений и состоянием моделирования климата. Восполнение этих пробелов являются необходимым условием уточнения оценок будущих изменений климата, в частности, в Арктике. Кроме того, каков бы ни был прогресс в наблюдениях и моделировании, хаотическая природа климатической системы всегда будет вносить неопределенности в прогнозы, предопределяя таким образом их вероятностный характер.

В этих условиях необходимо научиться принимать наилучшие решения, касающиеся адаптации и смягчения негативных климатических воздействий. Учитывая высокую цену ошибочных решений, необходимо активно развивать научные исследования (в частности, Арктики) – с целью минимизации неопределенностей региональных прогнозов и оценок изменений климата и, соответственно, последствий этих изменений.

В частности, научному сообществу предстоит большая работа по развитию возможностей, которые предоставляют современные высокие технологии, прежде всего, сложные физико-математические модели климатической системы. По этой причине развитие методов интерпретации климатических данных вообще, в том числе – модельных, для прикладных целей следует рассматривать как остро актуальную область исследований. Необходима интенсивная разработка методов, моделей и технологий, обеспечивающих адекватное использование результатов климатического моделирования в решении прикладных задач, в том числе в контексте экономических исследований.

Следует отметить, что под флагом адаптации – в Арктике ли, или в любом другом регионе – можно тратить огромные финансовые и другие средства, не решая задач адаптации! Никакой реальной адаптации – без науки, включающей постоянный мониторинг климатической системы и корректировку оценок ее происходящих и ожидаемых изменений, равно как и мониторинг эффективности принятых и корректировку планируемых адаптационных мер, – не получится. Есть опасение, что сегодня это осознают далеко не все потенциальные участники процесса.

Библиография

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.

ВМО, 2016: The global climate in 2011-2015. WMO-№. 1179, 28 pp.

ВМО, 2017: Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2016 году. Всемирная метеорологическая организация, 2017, ВМО-№ 1189, 24 с. http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414

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

Елисеев А.В., Семёнов В.А., 2016: Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // Доклады Академии Наук. Том 471. № 2. С. 214–218;

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

Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по Изменению климата / Ред. Р.К. Пачаури, А. Райзингер и др. Женева, 2007.

Кароль И.Л., Киселев А.А., 2012: Радиационные и температурные индексы короткоживущих атмосферных «движителей» текущего изменения климата // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 567. С. 284–291.

Кароль И.Л., Киселев А.А., Генихович Е.Л., Чичерин С.С., 2013: Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 5. С. 503–522.

Катцов В.М. (ред.), 2017: Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Климатический центр Росгидромета. 106 с.

Катцов В.М., Алексеев Г.В., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Бекряев Р.В., Говоркова В.А., 2007: Эволюция ледяного покрова Мирового океана в 20-м и 21-м веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 2. С. 1–17.

Катцов В.М., Говоркова В.А., 2013: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и среднегодового стока на территории России: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5). Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 569. С. 76–98.

Катцов В.М., Киселев А.А., Мелешко, В.П., Павлова Т.В., 2017: Глобальные изменения климата и основные сценарии и особенности изменений климата в Арктике: модели, оценки, прогнозы / В кн. «Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата» /под ред. акад. Б.Н. Порфирьева. – М: Научный консультант. С. 17–52.

Катцов В.М., Кобышева Н.В., Мелешко В.П., Порфирьев Б.Н., Ревич Б.А., Сиротенко О.Д., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Чичерин С.С., Шалыгин А.Л., 2011: Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Катцов В.М. Б.Н. Порфирьев, ред. – Росгидромет. 251 с.

Катцов В.М., Павлова Т.В., 2015: Арктика в контексте «гранд-вызовов» климатической науке // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 579. С. 66–78.

Катцов В.М., Порфирьев Б.Н., 2012: Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. № 2 (6). С. 66–79.

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

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., Мелешко В.П., Говоркова В.А., Надёжина Е.Д., Павлова Т.В., Школьник И.М., 2008: Модели, предназначенные для оценки будущих изменений климата / Оценочный Доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» (А.И. Бедрицкий и др., ред.), т.1. С. 112–151.

Катцов, В.М., Павлова Т.В., 2015: Арктика в контексте «гранд-вызовов» климатической науке // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 579. С. 66–78.

Катцов, В.М., Павлова Т.В., 2015: Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // Труды Главной геофизической обсерватории им.А.И. Воейкова. Вып. 579. С.7–21.

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.

Киселев А.А., Кароль И.Л. , 2015: Еще раз про метан // Природа. № 11, С. 9–17.

Киселев А.А., Решетников А.И., 2013: Метан в российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Проблемы Арктики и Антарктики. № 2. С. 5–15.

Климатическая доктрина Российской Федерации. Утверждена Распоряжением Президента Российской Федерации от 17.12.2009 г. № 861-рп. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/6365

Лексин В.Н., Порфирьев Б.Н., 2016: Государственное управление развитием Арктической зоны Российской Федерации: задачи, проблемы, решения: монография / Науч. ред. академик В.В. Ивантер – М.: Научный консультант. 194 с.

Надёжина Е.Д., Орленко Л.Р., Пикалёва 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.

Национальный Доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2014 гг. Часть 1. Москва, 2016, 476 с.
http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/RUS-NIR-2016_vol1.pdf.

Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Под ред. В.М. Катцова и Б.Н. Порфирьева. М.: Д′АРТ, 2011. 252 с.

Павлова Т. В., Катцов В. М., 2013: Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 568. С. 7–25.

Павлова Т.В., Катцов В. М., Пикалева А. А., Спорышев П.В., Говоркова В. А., 2013: Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 569. С. 38–61.

Павлова Т.В., Катцов В.М., 2015: Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 579. С. 22–36.

Павлова Т.В., Катцов В.М., Говоркова В.А., 2011: Морской лед в моделях CMIP5: ближе к реальности? // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 564. С. 7–18.

Павлова Т.В., Катцов В.М., Мелешко В. П., Школьник И. М., Говоркова В. А., Надежина Е. Д., 2014: Новое поколение климатических моделей // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 575. С. 5–64.

Пикалёва А.А., Надёжина 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.

Порфирьев Б.Н. (ред.), 2017: Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата. М: Научный консультант. 304 с.

Порфирьев Б.Н., 2008: Экономика климатических изменений. М.: Анкил. 168 с.

Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., 2016: Управление климатическими рисками развития российской Арктики: приоритет адаптации // Управление риском. № 4. ООО "Анкил". Москва. С. 39–47.

Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., 2016: Эколого-климатические риски социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации // Экологический вестник России. № 1. С. 44–51;

Порфирьев Б.Н., Хлебникова Е.И., 2015: Строительство в условиях изменений климата в Арктике: риски и возможности их снижения // Экономика строительства. № 6. С. 4–15.

Ревич Б.А., Терентьев Н.Е., 2015: Оценка влияния климатических изменений на здоровье населения европейской части российской Арктики // Управление риском. № 4. С. 35–42.

Росгидромет, 2008: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Бедрицкий А.И. и др., ред.), Росгидромет, 2008, т.1 (230 с.) и т.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., Росгидромет, 2014, 1009 с.: http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52

Росгидромет, 2017: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Росгидромет, М., 2017, 70 с.
http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/doc2016.pdf

Свод правил СП131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М., Минрегион России, 2012, 386 с.

Свод правил СП20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. — М., Минрегион России, 2011, 96 с.

Север и Арктика в новой парадигме мирового развития: актуальные проблемы, тенденции, перспективы. Научно-аналитический доклад / Под ред. В.С. Селина, Т.П. Скуфьиной, Е.П. Башмаковой, Е.Е. Торопушиной. – Апатиты, КНЦ РАН, 2016. 420 с.

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

Спорышев П.В., Катцов В.М., 2006: Пространственно-временные особенности глобального потепления // Доклады АН. Т.41. №4. С. 1–6.

Спорышев П.В., Катцов В.М., Говоркова В.А., 2016: Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 583, С. 45–84.

Спорышев П.В., Катцов В.М., Гулев С.К., 2018: Изменения приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Доклады РАН (в печати).

Спорышев П.В., Катцов В.М., Мелешко В.П., Алексеев Г.В., Кароль И.Л., Мирвис В.М., 2014: Причины наблюдаемых изменений климата // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 574. С. 39–124.

Спорышев, П.В., В. М. Катцов, В. А. Матюгин, 2012: Согласованность изменений температуры на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // Метеорология и гидрология. № 1. С. 5–19.

Спорышев, П.В., Мирвис В.М., Катцов В.М., Мелешко В.П., Ранькова Э.Я., 2008: Антропогенный вклад в изменение климата / Оценочный Доклад Росгидромета

«Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» / А.И. Бедрицкий и др., ред., т. 1. С. 152–173.

Стандарт организации СТО 36554501-015-2008 «Нагрузки и воздействия». М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. 52 с.

Стратегия адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и НАО Российской Федерации. Архангельск, 2012. 100 с. URL: http://www.nsmu.ru/science/nii_pol_med/Izenenie_climata/Strategiya.nsmu.pdf.

Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М., Минрегион России, 2012, 386 с.

Указ Президента РФ от 2 мая 2014 года № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации».

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. 2014. с. 801-830; http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016-03-21-16-23-52.

Хлебникова Е.И., Дацюк Т.А., Салль И.А., 2014: Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 574. С. 125–178.

Хлебникова Е.И., Катцов В.М., Пикалева А.А., Школьник И.М., 2018: Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории российской Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология (в печати).

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.

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.

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.

Шестое Национальное Сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2013, 202 с., http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/6nc_rus_final.pdf)

Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н., 2012: Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине 21 века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5–23.

Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. – СПб: Гидрометеоиздат, 2005, 319 с.

Alexeev, V.A., Ivanov V.V., Kwok R. and L.H. Smedsrud, 2013: North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice. The Cryosphere Discuss., 7, pp. 245–265. doi:10.5194/tcd-7-245/2013/.

AMAP, 2015: AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. vii + 139 pp. http://www.amap.no/documents/doc/AMAP-Assessment-2015-Methane-as-an-Arctic-climate-forcer/1285.

AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic (AACA) - Baffin Bay / Davis Strait Region Overview report. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 24 pp. https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-AACA-Baffin-Bay-Davis-Strait-Region-Overview-report/1530

AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic (AACA) - Barents Area Overview report. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 24 pp. https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-AACA-Barents-Area-Overview-report/1529

AMAP, 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic (AACA) - Bering/Chukchi/Beaufort Region Overview report. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 24 pp. https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-AACA-BeringChukchiBeaufort-Region-Overview-report/1531

Arctic Council, 2016: Arctic Resilience Report. / M. Carson and G. Peterson (eds). Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm, December 2016. 218 p. http://www.arctic-council.org/arr

Arctic Council, 2017: Expert Group on Black Carbon and Methane Summary of Progress and Recommendations. 47 pp. https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/1936

Baron R.E., Montgomery W.D., Tuladhar S.D., 2010: An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change. Copenhagen consensus on climate. 31 p. http://www.copenhagenconsensus.com/sites/default/files/ap_black_carbon_baron_montgomery_tuladhar_v.4.0.pdf

Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S., 2013: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research. V. 118. № 11. P. 5380–5552. doi: 10.1002/jgrd.50171.

Bony S., Stevens B., 2012: Clouds, Circulation and Climate Sensitivity: How the interactions between clouds, greenhouse gases and aerosols affect temperature and precipitation in a changing climate. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/gc-clouds

Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A. and E.S. Melnikov, 1997: International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. U.S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series, Map CP-45. Scale 1:10,000,000.

Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and E.S. Melnikov, 1998: Digital circum-arctic map of permafrost and groundice conditions. In Circumpolar Active-Layer Permafrost System (CAPS) CD-ROM, version 1.0. National Snow and Ice Data Center. University of Colorado at Boulder.

Carmack E., Polyakov I., Padman L., Fer I., Hunke E., Hutchings J., Jackson J., Kelley D., Kwok R., Layton C., Melling H., Perovich D., Persson O., Ruddick B., Timmermans M.-L.,

Toole J., Ross T., Vavrus S., and P. Winsor, 2015: Toward Quantifying the Increasing Role of Oceanic Heat in Sea Ice Loss in the New Arctic. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96. P. 2079–2105. doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00177.1

Christensen JH, Kjellström E, Giorgi F, Lenderink G, Rummukainen M., 2010: Weight assignment in regional climate models. Climate Research. 44. № 2–3, 179–194;
doi: https://doi.org/10.3354/cr00916

Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Serra N., Koldunov N.V., Ivanov V.V., Schauer U., Polyakov I.V., Barber D., Janout M., Lien V.S. et al., 2014: Heat loss from the Atlantic water layer in the northern Kara Sea: causes and consequences. Ocean Science. 10(4). P. 719–730.

Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A., 2016: Sea Ice Index, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: 10.7265/N5736NV7

Flato G., Kattsov V., Baeseman V., 2015: Melting Ice – Global Consequences. Initial implementation plan for the WCRP Grand Challenge on the Cryosphere in a Changing Climate. http://www.wcrp-climate.org/GRAND%20CHALLENGES/Melting%20Ice/documents/Melting_Ice_Global_Consequences_20_Mar_2015-2.pdf

Four Twenty Seven and Notre Dame Global Adaptation Index, 2015: 2015 Corporate adaptation survey. Four Twenty Seven and Notre Dame Global Adaptation Index with support from BSR. May 2015. 27 p.

Giorgi F. and Gutowski W.J., 2015: Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. Annual Review of Environment and Resources. Vol. 40. P. 467–490;
doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217.

Inoue J., Hori M.E., Takaya K., 2012: The role of Barents sea ice in the Wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. Journal of Climate. Vol. 25. P. 2561–2568.

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

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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

Kattsov V, Flato G., Bony S., Gille S., Kirtman B., Ryabinin V., Scaife A., Trenberth K., 2012: Cryosphere in a changing climate: A grand challenge of climate science. White Paper on WCRP Grand Challenge.
http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_cryo.pdf

Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J., Langenfelds, Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G., 2013: Three decades of global methane sources and sinks. Nature Geoscience. Vol. 6. № 10. P. 813–823.

Laprise R., 2008: Regional climate modeling. J. Comput. Phys. 227. №. 7. P. 3641–3666; doi:10.1016/j.jcp.2006.10.024.

Lindsay, R. and Schweiger, A., 2015. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. The Cryosphere, 9 (1). P. 269–283.

Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J. and K.E. Taylor, 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. Bull. Amer. Meteor. Soc. 88. 1383–1394. DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1383.

Nakićenović N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J, Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., T. Morita, Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000: IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press. United Kingdom and New York, NY, USA.

Parkinson C.L., 2014: Spatially mapped reductions in the length of the Arctic sea ice season. Geophysical Research Letters. 41 (12). P. 4316–4322.

Petoukhov V., Semenov V.A., 2010: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. J. Geophys. Res. 115. doi:10.1029/2009jd013568;

Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A. and K.E. Taylor, 2007: Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA;

Rogelj J., Meinshausen M. and R. Knutti, 2012: Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Letters, Nature Climate Change. Published online: 5 February 2012 doi: 10.1038/NCLIMATE1385.

Rummukainen M., 2016: Added value in regional climate modeling. Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change, 7, 145–159; doi: 10.1002/wcc.378.

Shindell D., Borgford-Parnell N., Brauer M., Haines A., Kuylenstierna J.C.I., Leonard S.A., Ramanathan V., Ravishankara A., Amann M., Srivastava L., 2017: A climate policy pathway for near- and long-term benefits. Science. V. 356. Issue 6337. P. 493–494.

Shkolnik I.M. and 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: 10.1088/1748-9326/8/4/04500

Slater A.G., and D.M. Lawrence, 2013. Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models. J. Climate. 26. 5608–5623. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00341.1

Snow, Water, Ice and Permafrost. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2017, 20 pp.

Stammer D., Asrar G., Steffen K., 2012: Sea-Level Rise and Regional Impacts. White Paper on WCRP Grand Challenge.
http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC-regional_sealevel_draft.pdf

Stohl A., Aamaas B., Amann M., Baker L. H., Bellouin N., Berntsen T. K., Boucher O., Cherian R., Collins W., Daskalakis N., Dusinska M., Eckhardt S., Fuglestvedt J. S., Harju M., Heyes C., Hodnebrog Ø., Hao J., Im U., Kanakidou M., Klimont Z., Kupiainen K., Law K. S., Lund M. T., Maas R., MacIntosh C. R., Myhre G., Myriokefalitakis S., Olivié D., Quaas J., Quennehen B., Raut J.-C., Rumbold S. T., Samset B. H., Schulz M., Seland Ø., Shine K. P., Skeie R. B., Wang S., Yttri K. E., and Zhu T., 2015: Evaluating the climate and air quality impacts of short-lived pollutants. Atmos. Chem. Phys. 15. P. 10529–10566, https://doi.org/10.5194/acp-15-10529-2015.

Stroeve J. C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., and W.N. Meier, 2012: Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. GRL. 39. L16502, 7 PP., 2012, doi:10.1029/2012GL052676;

Taylor K.E., Stouffer R.J. and Meehl G.A., 2012: An Overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 93. P. 485–498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Timmermans M.-L., and A. Proshutinsky, 2014: Arctic Ocean sea surface temperatures. Arctic Report Card: Update for 2014,
http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/sea_surface_temperature.html

Trenberth K., Yanda P., Le Treut H., GEWEX, CLIVAR, WGCM, WGSIP, 2012: WCRP Grand Challenge: Changes in Water Availability. White Paper on WCRP Grand Challenge. http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_gsq_water_v5.pdf

UNEP, 2011: Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. United Nations Environment Programme, 2011. 630 p.

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

Wang M., Overland J.E., Kattsov V., Walsh J.E., Zhang X., Pavlova T., 2007: Intrinsic versus forced variation in coupled climate model simulations over the Arctic during the 20th Century. J. Climate. 20. P. 1084–1098.

Wang, M., Overland, J.E., 2012: Summer Arctic sea ice will be gone sooner or later – an update from CMIP5 models. Geophysical Research Letters. 39. L18501, doi:10.1029/2012GL052868.

WMO, 2017: WMO Greenhouse Gas Bulletin. No.13, 30 October 2017. 8 pp. https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_EN_final_1_1.pdf

Zhang, X., Hegerl G., Seneviratne S., Stewart R., Zwiers F., Alexander L. , 2012: WCRP Grand Challenge: Understanding and Predicting Weather and Climate Extremes. White Paper on WCRP Grand Challenge.
http://www.wcrp-climate.org/images/documents/grand_challenges/GC_Extremes_v2.pdf

Научное издание

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ:
МЕСТО КЛИМАТИЧЕСКОЙ НАУКИ
В ПЛАНИРОВАНИИ АДАПТАЦИИ

Под редакцией
д-ра физ.- мат. наук В. М.Катцова

Подписано в печать 27.12.2017. Формат 60x84/8. Бумага мелованная.
Печать офсетная. Печ. л. 13,0. Тираж 300 экз. Заказ №5815.
Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28Ц, оф. 1Н