

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

604

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

Санкт-Петербург
2022

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
Телефон: (812) 297-43-90
ФАКС: (812) 297-86-61
e-mail: director@main.mgo.rssi.ru
web site: <http://www.voeikovmgo.ru>

Редакционная коллегия

Д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович,
чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук С. К. Гулев, канд. физ.-мат. наук А. А. Киселев,
д-р физ.-мат. наук В. П. Мелешко, канд. физ.-мат. наук Т. В. Павлова,
канд. физ.-мат. наук Е. В. Розанов,
д-р техн. наук А. А. Синькевич, канд. физ.-мат. наук А. П. Соколов,
канд. физ.-мат. наук П. В. Спорышев, канд. физ.-мат. наук Е. Е. Федорович,
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

Сборник рассчитан на широкий круг научных работников и инженеров, интересующихся результатами современных исследований в области метеорологии и прикладной геофизики и их практическим использованием.

В соответствии с решением Президиума высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по специальностям: 25.00.29 – геофизика, 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология. соответствующих специальностей.

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. S. K. Gulev,
Dr. A. A. Kiselev, Dr. V. P. Meleshko,
Dr. T. V. Pavlova, Dr. E. V. Rozanov, Dr. A. A. Sinkevich, Dr. A. P. Sokolov, Dr. P. V. Sporyshev,
Dr. E. E. Fedorovich, Dr. E. L. Makhotkina (Editorial board secretary)

The publication deals with the results of theoretical and experimental studies on the present-day problems of changes in climate and weather forecast, atmospheric diffusion and atmospheric air condition monitoring, climatology, remote sounding of the atmosphere.

The publication is meant for a wide circle of specialists interested in the results of meteorological science development and their practical application.

It is recommended for post-graduates and students in their third or fourth year of respective speciality.

© Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова»,
2022

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В.М. Катцов, Т.В. Павлова, В.А. Говоркова, В.П. Мелешко, П.В. Спорышев, Е.И. Хлебникова, Школьник И.М.</i> Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6.	5
<i>И.М. Школьник., Е.М. Акентьева, М.В. Ключева, В.В. Стадник, Е.И. Хлебникова, Д.В. Фасолько, Е.Н. Разова, Ю.Л. Рудакова, В.Н. Павлова.</i> Федеральные округа России: изменения климата и экономика.	55
<i>Е. М. Акентьева.</i> Влияние изменения климата на основные отрасли добывающей промышленности России. ...	202
<i>Е.М. Акентьева, В.В. Стадник, Д.В. Фасолько, В.А. Задворных.</i> О влиянии климата на производство энергии.	221

CONTENTS

<i>Kattsov V.M., Pavlova T.V., Govorkova V.A., Meleshko V.P., Sporyshev P.V., Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M.</i> Climate change projections over the territory of Russia through the XXI century based on ensembles of CMIP6 models.	5
<i>Shkolnik I.M., Akentyeva E.M., Klueva M.V., Stadnik V.V., Khlebnikova E.I., Faselko D.V., Razova E.N., Rudakova Yu. L., Pavlova V.N.</i> Federal districts: climate change and economy.	55
<i>Akentyeva E. M.</i> The impact of climate change on the main sectors of the extractive industry in Russia.	202
<i>Akentyeva E.M., Stadnik V.V., Faselko D.V., Zadvornikh V.A.</i> On the impact climate on energy production.	221

**СЦЕНАРНЫЕ ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ
НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ
С МОДЕЛЯМИ CMIP6**

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

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: pavlova@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 1.03.2022
Поступила после доработки 1.06.2022

Введение

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

численные эксперименты для выяснения причин и устранения недостатков моделей; документировать изменения модели.

Наиболее известным международным проектом сравнения моделей является Проект Сравнения Объединенных Моделей (атмосферы и океана) СМІР (Coupled Model Intercomparison Project). Именно этот проект, организованный в рамках Всемирной программы исследований климата¹, начиная с первой своей фазы, является основным источником сценарных прогнозов изменения климата для Оценочных докладов МГЭИК. В рамках подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013) с помощью ансамбля моделей, участвовавших в пятой фазе проекта (СМІР5) (Taylor et al., 2012), были выполнены расчеты климата XXI в. для различных сценариев антропогенных выбросов (van Vuuren et al., 2011). Результаты этих расчетов явились основой многих исследований по оценке последствий изменений климата для территории России (см., например, Катцов, Говоркова, 2013; Мелешко, Говоркова, 2013; Павлова, Катцов, 2013; Павлова и др., 2013; Спорышев, Говоркова, 2013), которые нашли отражение во Втором оценочном докладе Росгидромета (Росгидромет, 2014). В настоящее время проект СМІР находится в своей 6-й фазе (СМІР6) (Eyring et al., 2016).

С начала 1990-х годов количество глобальных климатических моделей росло с впечатляющей скоростью и в СМІР6 превысило сотню. Зачастую существенное увеличение количества моделей в СМІР6 происходило в результате того, что некоторые центры были представлены в проекте несколькими моделями.

В приведенном ниже анализе результатов сценарного прогнозирования климата использованы данные 37 моделей (в отдельных случаях — меньшего их числа), доступные к началу проведения работы (исследования).

Одновременно с увеличением количества моделей, участвующих в СМІР, возрастали их пространственное разрешение (рис. 1) и физическая полнота.

¹ <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>

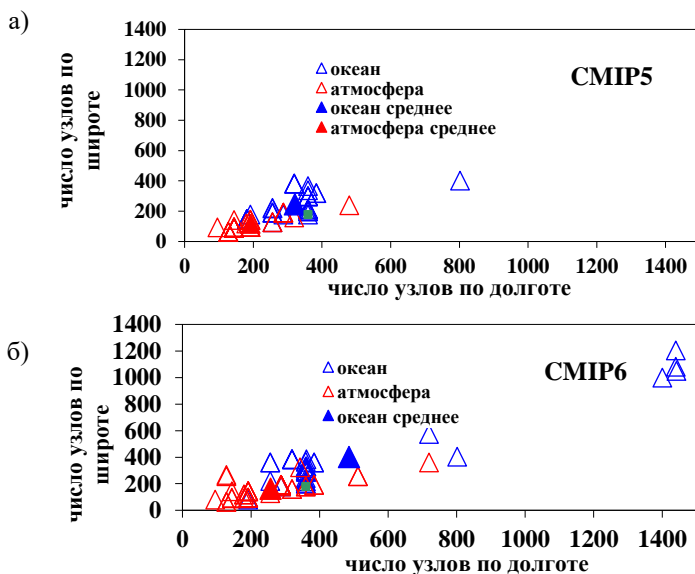


Рис. 1. Сравнение горизонтального разрешения (числа узлов сетки по широте и долготе) для атмосферного (не закрашенные красные треугольники) и океанического (не закрашенные синие треугольники) блоков МОЦАО CMIP5 (а) и CMIP6 (б).

Закрашенные треугольники обозначают среднее значение по ансамблям из 31 модели CMIP5 и 37 моделей CMIP6. Зеленый квадрат соответствует широтно-долготному разрешению $1^\circ \times 1^\circ$

По сравнению с ансамблем CMIP5, разброс оценок глобального потепления к концу XXI в. (по отношению к принятому в Шестом оценочном докладе МГЭИК базовому периоду 1995–2014 гг.) в ансамбле CMIP6 оказался больше примерно на 20 % (Lee et al., 2021). Он увеличился, главным образом, из-за повышения его верхней границы, что связывается с возросшей чувствительностью ряда климатических моделей (Meehl et al., 2020; Tokarska et al., 2020; Zelinka et al., 2020). Последнее обстоятельство, по мнению ряда исследователей, является следствием повышения пространственного разрешения моделей. Все это вновь возвращает научное сообщество к проблеме формирования модельных ансамблей и возможности

«взвешивания» результатов моделей, входящих в ансамбль, в зависимости от их «качества» (Росгидромет, 2014).

Как известно (Росгидромет, 2008), наиболее высокую успешность воспроизведения средних климатических характеристик при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по ансамблю моделей (рис. 2).

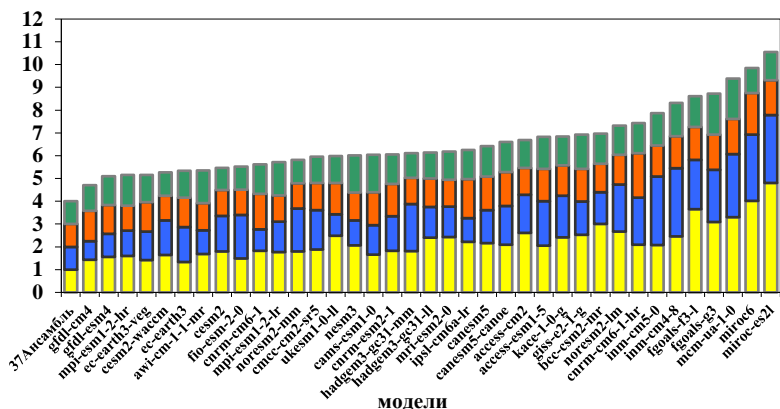


Рис. 2. Средние за год среднеквадратические отклонения температуры приземного воздуха на континентах (оранжевый цвет), температуры поверхности океанов (голубой цвет), количества осадков (зеленый цвет) и атмосферного давления на уровне моря (желтый цвет), рассчитанные по 37 моделям СМIP6 в Северном полушарии для периода 1995–2014 гг. Отклонения отдельных переменных для каждой модели нормированы на соответствующие отклонения, вычисленные по ансамблю из 37 моделей, и суммированы по четырем указанным переменным. Модели ранжированы в порядке ухудшения качества. При вычислении средних квадратических отклонений использованы: для температуры приземного воздуха и температуры поверхности океанов — данные наблюдений (CRU-4, 2020; Rayner et al., 2003), для давления и осадков — данные реанализа (ERA-5, 2020)

Для отдельных климатических характеристик, воспроизводимых отдельными моделями, может быть и не так. Обычно это объясняют тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности часто являются случайными по отношению к ансамблю

моделей и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются. В то время, как эксперименты с единственной моделью чрезвычайно важны для проверки новых научных гипотез и теорий, мультимодельные ансамбли дополнительно позволяют оценивать устойчивость (робастность) и воспроизводимость новых результатов, а также оценивать их неопределенность, связанную с собственной структурой модели и генерируемой ею изменчивостью процессов (Hawkins, Sutton, 2009).

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

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

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

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

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

1. Сценарии воздействия на климатическую систему

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

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

(Representative Concentration Pathway; Репрезентативная траектория концентраций атмосферных примесей).

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

SSP1: «Устойчивость (переход на зеленый путь)»

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

SSP2: «Центральная часть дороги»

Социальные, экономические и технологические тенденции в мире не отличаются заметно от исторических закономерностей. Развитие

и рост доходов происходят неравномерно: одни страны добиваются прогресса, а другие не оправдывают ожиданий. Глобальные и национальные институты работают над достижением целей устойчивого развития, но делают это медленно. Экологические системы деградируют, хотя есть некоторые улучшения, и в целом интенсивность использования ресурсов и энергии снижается. Глобальный рост населения является умеренным и стабилизируется во второй половине века. Неравенство доходов сохраняется или уменьшается очень медленно, и остаются проблемы, связанные с уязвимостью перед социальными и экологическими изменениями.

SSP3: «Региональное соперничество (каменистая дорога)»

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

SSP4: «Неравенство (разделенная дорога)»

Различия в инвестициях в человеческий капитал в сочетании с растущим неравенством экономических возможностей и политической власти приводят к усилению неравенства и расслоения как между странами, так и внутри них. Увеличивается разрыв между сообществом стран, которые способствуют развитию наукоемких и капиталоемких секторов мировой экономики, и странами с низким уровнем образования и низкими доходами, которые работают в трудоемкой и низкотехнологичной экономике.

Социальная сплоченность снижается, а конфликты и беспорядки становятся все более обычным явлением. Глобальный энергетический сектор диверсифицируется за счет инвестиций как в углеродоемкие виды топлива, так и в низкоуглеродные источники энергии. Экологическая политика в регионах со средним и высоким доходом сосредоточена на местных проблемах.

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

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

Следует отметить, что при проведении климатических расчетов для Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013), поскольку подготовка сценариев SSP еще не была завершена, использовались сценарии RCP отдельно, без связи с какими-либо путями социально-экономического развития. Индекс сценария соответствовал величине глобального антропогенного радиационного воздействия (РВ), достигаемого к 2100 г., а именно 2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м² — RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 соответственно. Определение радиационного воздействия (the stratospherically adjusted radiative forcing) дано, в частности, в работе (Myhre et al., 2013). В дальнейшем для простоты об этих сценариях говорится как о сценариях RCP.

Для классификации сценариев в структуре SSP–RCP используются два индекса. Первый означает номер пути социально-экономического развития (от 1 до 5), а второй — величину РВ, достигаемого к 2100 г.,

а именно 1,9; 2,6; 3,4; 4,5; 6,0; 7,0; 8,5 Вт/м². Например, в сценарии SSP5-8.5 рассматривается путь SSP5, а величина РВ составляет 8,5 Вт/м². Далее для простоты изложения об этих сценариях говорится как о сценариях SSP; при этом подразумевается, что второй индекс в обозначении сценария указывает на соответствующую траекторию RCP.

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

Сценарии подразделяются на базовые, в которых развитие событий в будущем предполагает отсутствие новых возможностей по ослаблению антропогенных климатических воздействий, а также новых политических соглашений по вопросам климата, кроме тех, что действуют в настоящее время, и сценарии, в которых исследуются последствия политики ослабления климатических воздействий в применении к базовым сценариям. Как инструмент для возможного ослабления климатических воздействий используются предположения о совместной климатической политике, которые могут включать, в частности, ограничения или налогообложение эмиссий парниковых газов, а также политические соглашения, которые прямо касаются адаптации к климатическим изменениям, например создание международного адаптационного фонда (Kriegler et al., 2014).

Кроме того, предполагается применение технологий улавливания и хранения углерода при использовании ископаемого топлива, возможно в сочетании с технологиями нетрадиционной возобновляемой энергетики, одно из центральных мест в которой принадлежит биоэнергетике, создаваемой на основе преобразования энергии биомассы и биоотходов (Riahi et al., 2017). Все это потенциально может приводить к отрицательным эмиссиям парниковых газов (рис. 3а).

Сценарные расчеты в международном проекте сравнения климатических моделей CMIP6 выполнялись в рамках подпроекта ScenarioMIP (O'Neill et al., 2016; Tebaldi et al., 2021). По приоритету выполнения экспериментов было выбрано две группы сценариев. К группе первого приоритета относятся сценарии SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5 и SSP1-2.6, к группе второго — SSP4-6.0, SSP4-3.4, SSP1-1.9 и SSP5-3.4-OS. Сокращение OS (overshot) в обозначении сценария SSP5-3.4-OS указывает на то, что в этом сценарии быстрый рост эмиссий парниковых газов (в данном случае до 2040 г.) далее сменяется их быстрым падением (рис. 3а). Среди выбранных сценариев только два сценария, SSP5-8.5 и SSP3-7.0, являются базовыми, а в остальных предполагаются какие-либо меры смягчения антропогенных климатических воздействий.

В настоящей работе рассматриваются модельные прогнозы по сценариям слабого (SSP1-2.6), умеренного (SSP2-4.5) и сильного (SSP5-8.5) антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Отметим, что в соответствии с работой (O'Neill et al., 2020) все три выбранных сценария наиболее часто использовались в научных работах для получения климатических оценок. Учитывая близость по величине радиационного воздействия и ожидаемым температурным изменениям сценариев нового поколения SSP2-4.5 и SSP5-8.5 со сценариями предыдущего поколения RCP4.5 и RCP8.5 соответственно (рис. 3), естественно поставить вопрос о сравнении оценок, полученных по этим сценариям, что также делается в настоящей работе.

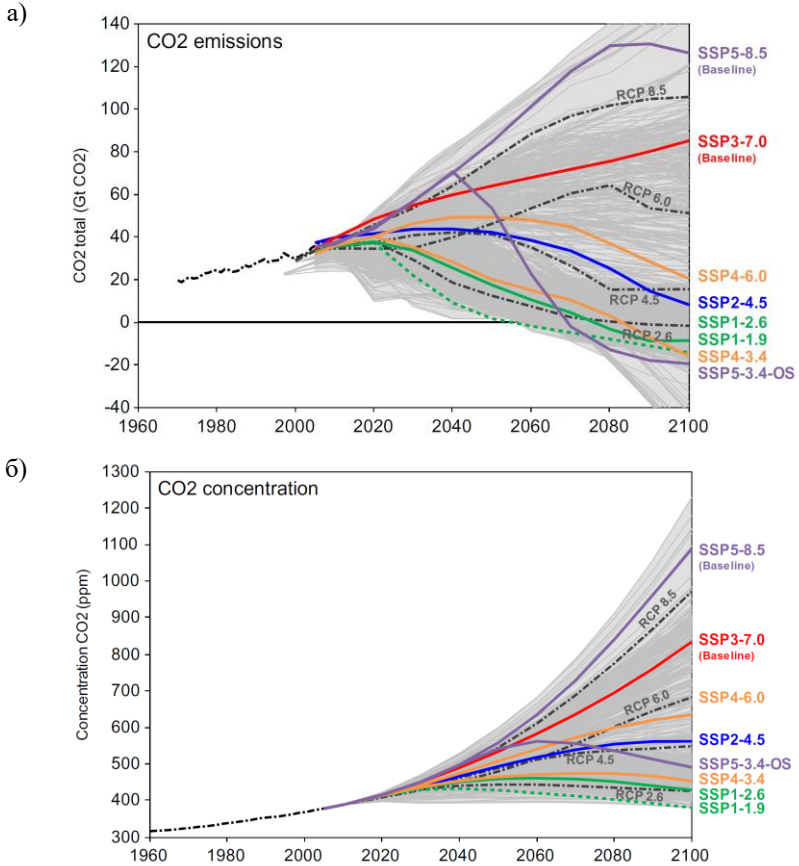
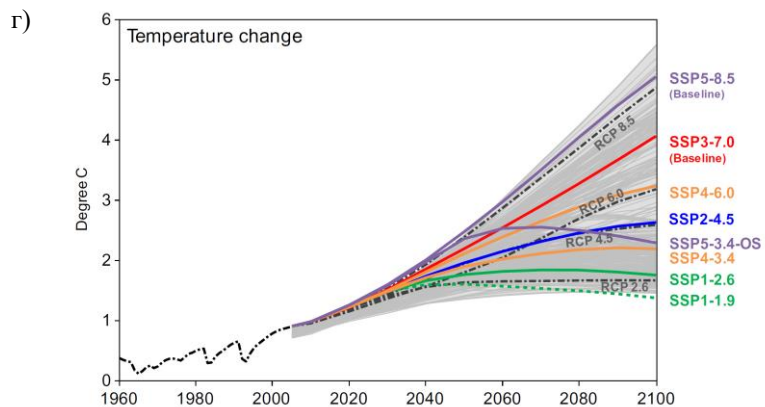
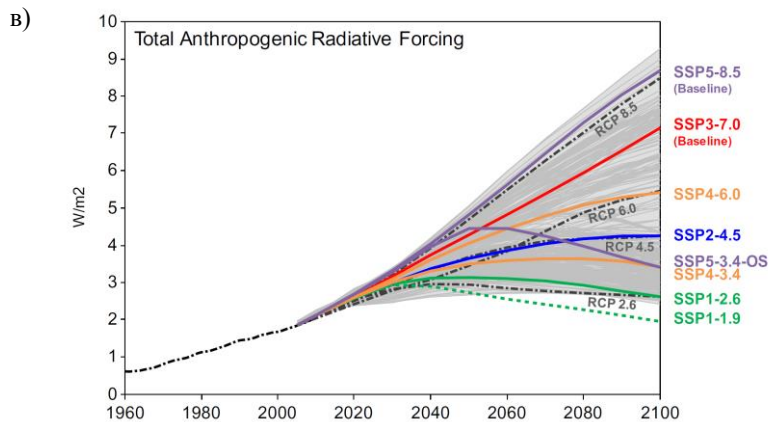


Рис. 3. Сравнение сценариев SSP и RCP. Эмиссии (а) и атмосферная концентрация (б), а также изменения средней глобальной температуры по сценариям SSP и RCP. Концентрация углекислого газа, радиационное климатическая модель (Riahi et al., 2017).

Серые области показывают разброс по сценариям в сценарной базе Пятого указывает, что сценарий является базовым, а сокращение «OS» (overshoot) быстрым падением. Рисунок из работы (O'Neill et al., 2016).



концентрация (б) углекислого газа, антропогенное радиационное приземного воздуха (г) со второй половины 20-го до конца XXI в. воздействие и изменения температуры получены по расчетам с простой

оценочного доклада МГЭИК. Надпись «Baseline» при обозначении сценария указывает, что быстрый рост эмиссий парниковых газов в сценарии сменяется их

2. Сценарные прогнозы изменений климата на территории Российской Федерации

2.1 Термический режим

Территория Российской Федерации, и особенно ее Арктической зоны (АЗРФ), по оценкам моделей СМIP6 для сценариев SSP (Riahi et al., 2017), как и по оценкам моделей предыдущих поколений для сценариев SRES (Nakićenović et al., 2000) и RCP (van Vuuren et al., 2011), остается регионом, в котором ожидаемое в XXI в. потепление климата существенно превышает среднее глобальное потепление для любого из рассматриваемых сценариев (рис. 4, 5). Особенно быстрое потепление ожидается в северном полярном регионе, а на территории Российской Федерации — в АЗРФ.

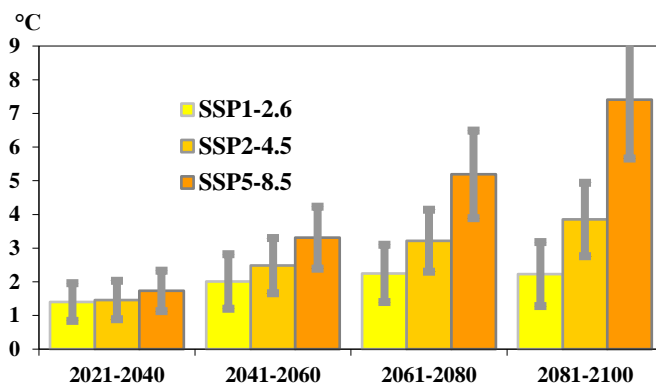


Рис. 4. Изменение средней годовой температуры приземного воздуха (°C) на территории Российской Федерации в XXI в. (в среднем за каждое из четырех 20-летий: 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100) по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5

по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей СМIP6 соответственно. Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях

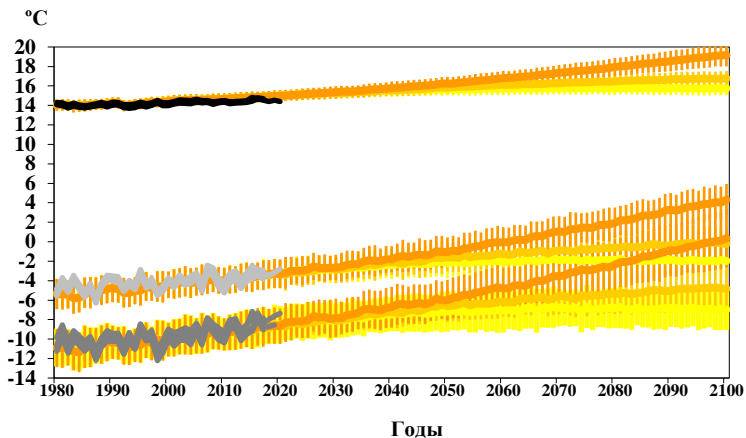


Рис. 5. Эволюция средней годовой температуры приземного воздуха (°C): глобальной (вверху), на территории Российской Федерации (в середине) и в АЗРФ (внизу) в период 1980–2100 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно.

Цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 4. Вертикальной штриховкой показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях для каждого года указанного периода. Реанализы и данные наблюдений представлены черными кривыми для глобальной температуры (ERA-5, 2020; NCEP/NCAR, 1996; MERRA-2, 2017), светло-серыми для территории Российской Федерации и темно-серыми для АЗРФ (ERA-5, 2020; NCEP/NCAR, 1996; MERRA-2, 2017; CRU-4, 2020; DEL, 2001). Источники данных наблюдений и реанализов на рисунке не идентифицированы, но позволяют составить представление о разбросе этих данных для разных областей осреднения

Такое географическое распределение давно известно из литературы, и его причины хорошо изучены (см., например, Росгидромет, 2008; 2014). То же относится и к особенностям сезонного распределения изменений термического режима на территории Российской Федерации: с выраженной зональностью зимнего потепления, достигающего максимальных значений в АЗРФ, и с существенно отличным характером летнего потепления (рис. 6, 7).

Сопоставление средних годовых оценок изменения приземной температуры воздуха по всей территории Российской Федерации

в XXI в., рассчитанных по ансамблю моделей CMIP5, сценарии RCP (Росгидромет, 2014), с соответствующими оценками по ансамблю CMIP6, сценарии SSP, указывает на систематически более теплый будущий климат по оценкам моделей последнего поколения при некотором увеличении межмодельного разброса (табл. 1).

Таблица 1

Изменения среднегодовой температуры приземного воздуха (°С) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения на территории России в середине (2041–2060) и конце (2080–2099²/2081–2100) XXI в. по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг., полученные для сценариев RCP4.5/SSP2-4.5 и RCP8.5/SSP5-8.5 по ансамблям моделей CMIP5 и CMIP6 соответственно

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

Повышение средней температуры приземного воздуха на протяжении XXI в. сопровождается ростом продолжительности волн тепла (рис. 8). При этом рост минимальной суточной температуры приземного воздуха на всей территории страны (рис. 9) практически повсеместно опережает рост максимальной суточной температуры (рис. 10), что приводит к уменьшению средней годовой амплитуды экстремальной (разности максимальной и минимальной суточной) температуры приземного воздуха (рис. 11). Указанные тенденции особенно отчетливо проявляются на территории АЗРФ (табл. 2).

² Для ансамбля моделей CMIP5 выбран период осреднения 2080–2099 гг., так как результаты расчетов некоторых моделей из ансамбля были представлены только по 2099 год.

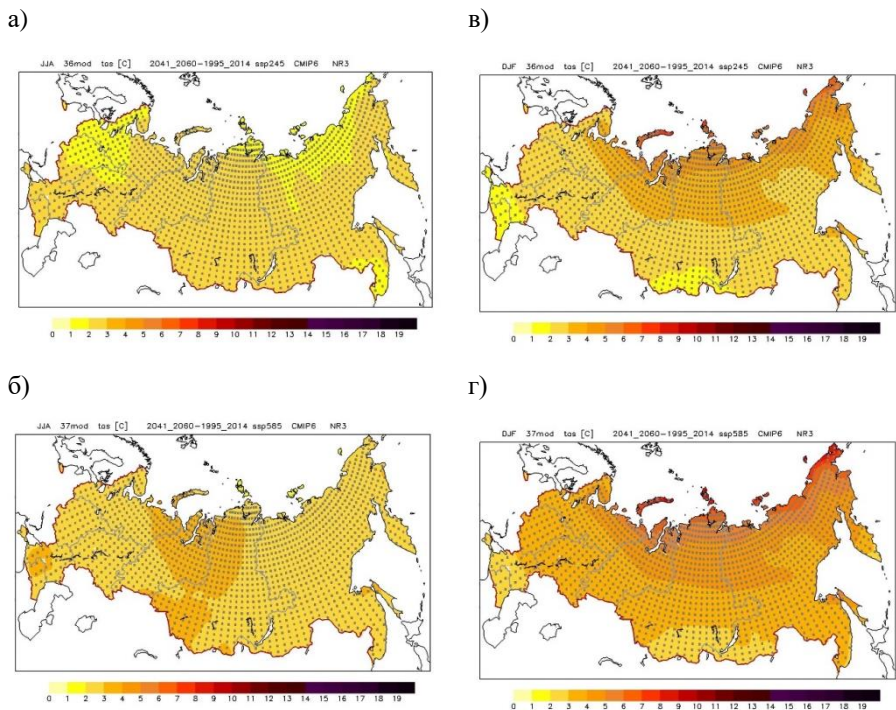
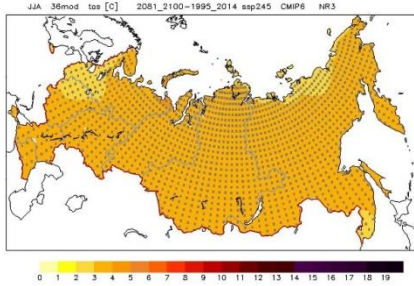


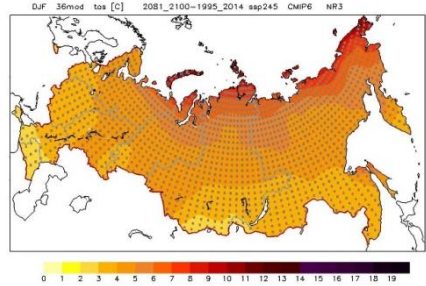
Рис. 6. Изменение средней сезонной температуры приземного воздуха (°C) на территории Российской Федерации в 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1995–2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

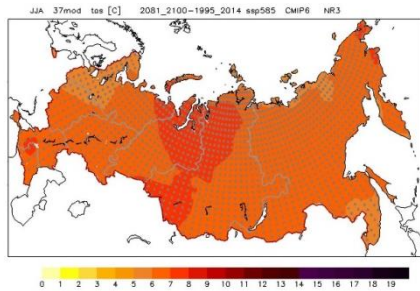
а)



в)



б)



г)

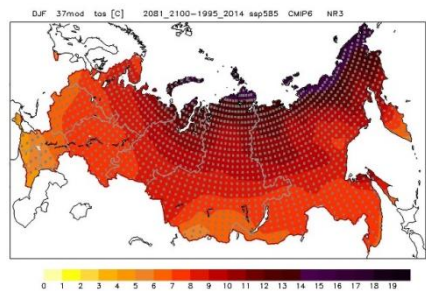
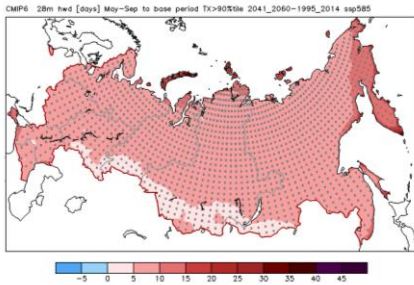


Рис. 7. Изменение средней сезонной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в 2081–2100 гг. по отношению к периоду 1995–2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

а)



б)

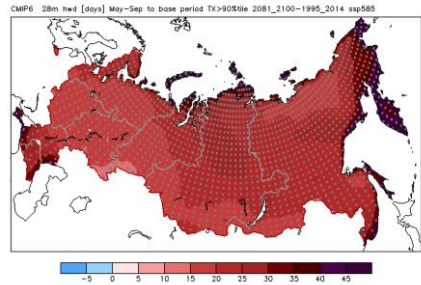
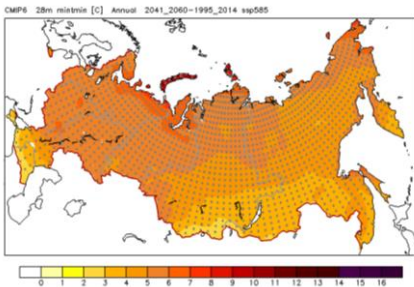


Рис. 8. Изменение средней за 20 лет продолжительности (сут.) максимальной за год волны тепла в теплый сезон (май–сентябрь) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

Волна тепла определяется как период не менее 3 дней, когда максимальная температура больше 90-го перцентиля. Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

а)



б)

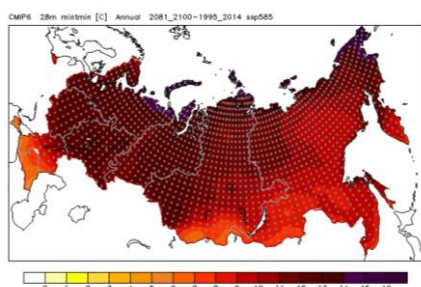
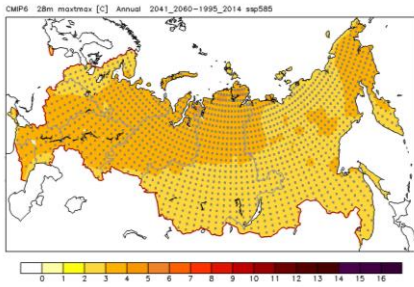


Рис. 9. Увеличение средней за 20 лет минимальной суточной температуры приземного воздуха (°C) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

а)



б)

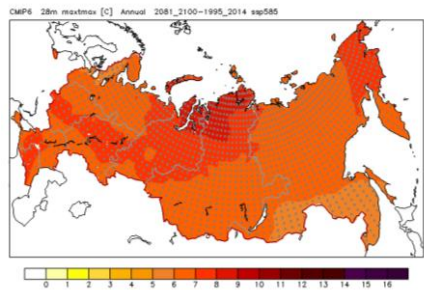
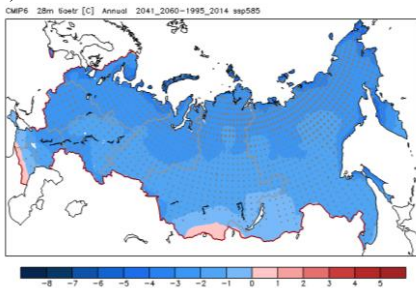


Рис. 10. Увеличение средней за 20 лет максимальной суточной температуры приземного воздуха (°C) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

а)



б)

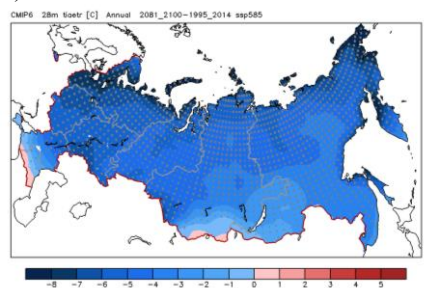


Рис. 11. Изменение средней за 20 лет годовой амплитуды экстремальной (разности максимальной и минимальной суточной) температуры приземного воздуха (°C) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. (сценарий SSP5-8.5) по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

Точками показаны регионы, где отношение среднего по ансамблю изменения характеристики и межмодельного разброса превышает 1

Таблица 2

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

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

2.2 Гидрологический режим

Атмосферные осадки. Среднегодовые атмосферные осадки в среднем по территории Российской Федерации, согласно оценкам моделей CMIP6, демонстрируют устойчивую тенденцию к росту для рассматриваемых сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему (рис. 12). Скорость роста среднегодовых осадков на территории России, и особенно в АЗРФ, превышает скорость роста средних глобальных осадков (рис. 13). Источники данных наблюдений и реанализов на рисунке 13 не идентифицированы, но позволяют составить представление о разбросе этих данных для разных областей осреднения.

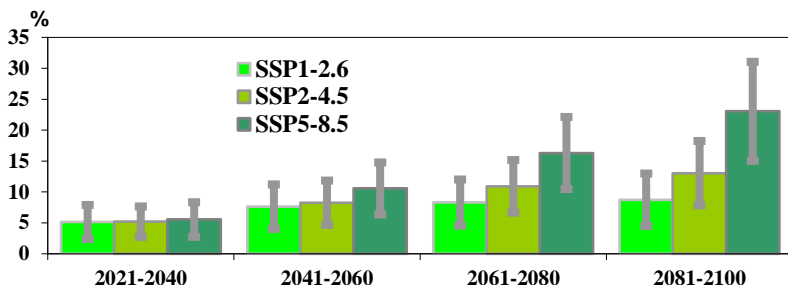


Рис. 12. Изменение средних годовых осадков (%) на территории Российской Федерации в XXI в. (в среднем за каждое из четырех 20-летий: 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100) по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно. Вертикальными отрезками показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях

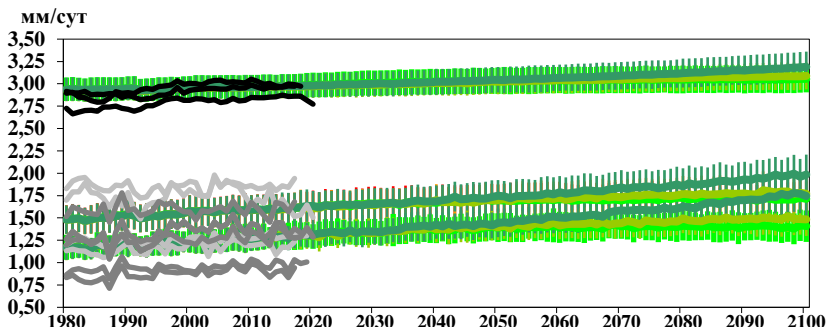


Рис. 13. Эволюция средних годовых значений атмосферных осадков (мм/сут.): глобальных (вверху), на территории России (в середине) и в АЗРФ (внизу) в период 1980–2100 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 по оценкам ансамблей из 36, 36 и 37 моделей CMIP6, соответственно. Цветовые обозначения для сценариев те же, что на рис. 12. Вертикальная штриховка — средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в ансамблях для каждого года указанного периода. Реанализы и данные наблюдений представлены черными кривыми для глобальных осадков (ERA-5, 2020; NCEP/NCAR, 1996; MERRA-2, 2017), светло-серыми для территории России и темно-серыми для АЗРФ (ERA-5, 2020; NCEP/NCAR, 1996; MERRA-2, 2017; CRU-4, 2020; DEL, 2001).

Эти оценки качественно согласуются с оценками моделей предыдущих поколений и для предыдущих групп сценариев (см. Росгидромет, 2008, 2014).

Средние годовые оценки изменения суммарных осадков по всей территории Российской Федерации в XXI в. в ансамбле сценарных прогнозов СМIP6, как и для приземной температуры воздуха (табл. 1), систематически больше, чем оценки ансамбля СМIP5 (табл. 3).

На протяжении XXI в. осадки растут зимой на всей территории Российской Федерации для всех сценариев (рис. 14 и 15). Согласно наиболее «агрессивному» сценарию SSP5-8.5, в Сибири местами уже к середине XXI в. возможен рост осадков в полтора раза относительно базового периода.

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

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

Таблица 3

Изменения среднегодовых суммарных осадков (%) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения на территории Российской Федерации в середине (2041–2060) и конце (2080–2099/2081–2100) XXI в. по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг., полученные для сценариев RCP4.5/SSP2-4.5 и RCP8.5/SSP5-8.5 по ансамблям моделей СМIP5 и СМIP6 соответственно

Ансамбль моделей, сценарий	2041–2060 гг.	2080–2099/ 2081–2100 гг.
СМIP5 RCP4.5	7 ± 3	10 ± 5
СМIP6 SSP2-4.5	8 ± 4	13 ± 5
СМIP5 RCP8.5	9 ± 4	20 ± 7
СМIP6 SSP5-8.5	11 ± 4	23 ± 8

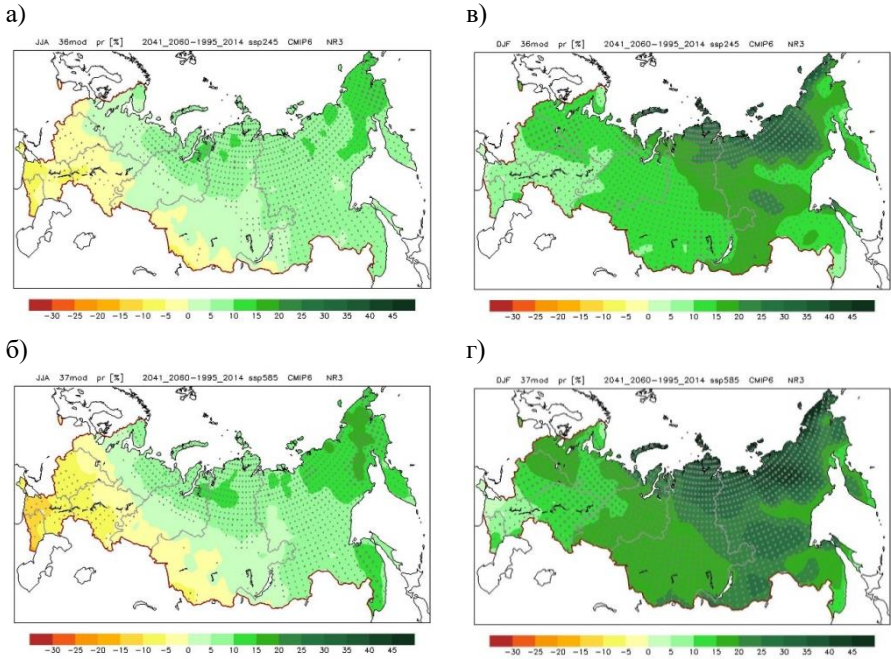


Рис. 14. Изменение средних сезонных осадков (%) в 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1995–2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно.

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

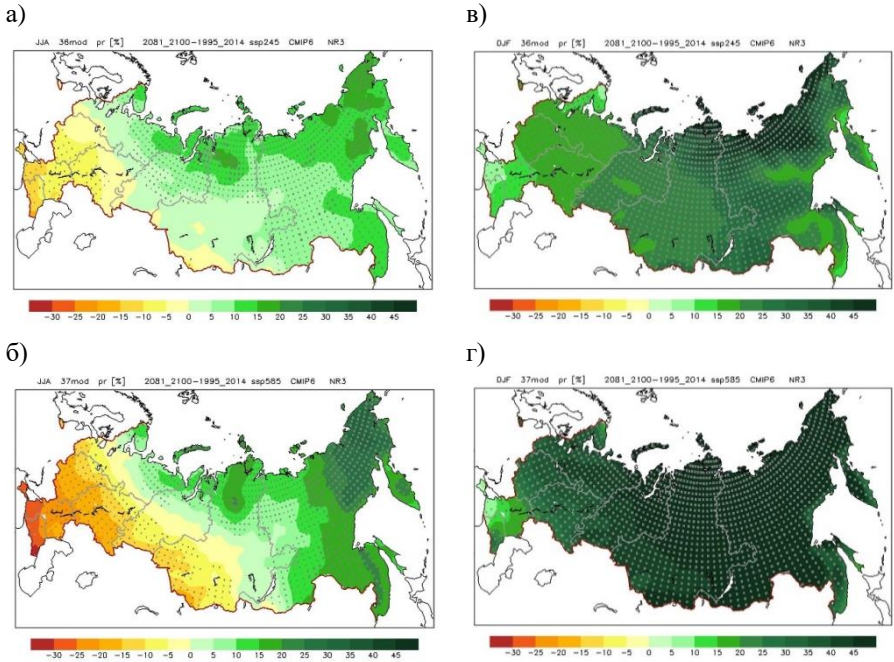


Рис. 15. Изменение средних сезонных осадков (%) в 2081–2100 гг. по отношению к периоду 1995–2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно.

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

Наиболее часто используемыми характеристиками экстремальности гидрологического режима являются максимальная продолжительность непрерывных периодов с осадками менее установленного значения (например, менее 1 мм/сут.) и максимальная сумма осадков за сутки.

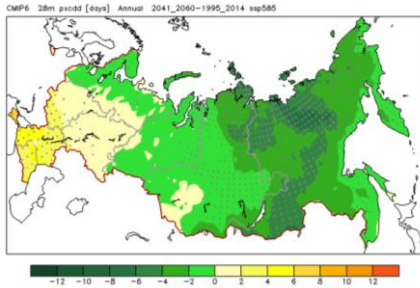
На юге Российской Федерации ожидается нарастание засушливости: увеличивается максимальная продолжительность непрерывных периодов с осадками менее 1 мм/сут., как в середине XXI в., так и в долгосрочной перспективе (рис. 16) (аналогичные оценки были получены ранее (Росгидромет, 2008, 2014)). При этом на остальной части территории Российской Федерации, в особенности в Сибири, ожидаются противоположные тенденции — продолжительность таких периодов сокращается. В среднем по всей территории Российской Федерации сокращение таких периодов для наиболее агрессивного сценария SSP5-8.5 к середине XXI в. составляет 2, а концу столетия — 3 суток (табл. 4). При этом для АЗРФ соответствующие оценки выше — 3 и 6 суток.

Таблица 4

Изменения средних за 20 лет характеристик экстремальности гидрологического режима и соответствующие межмодельные стандартные отклонения в середине (2041–2060) и конце (2081–2100) XXI в. по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг. (сценарий SSP5-8.5), полученные по ансамблю из 28 моделей СМIP6 для территории Российской Федерации и ее Арктической зоны

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

а)



б)

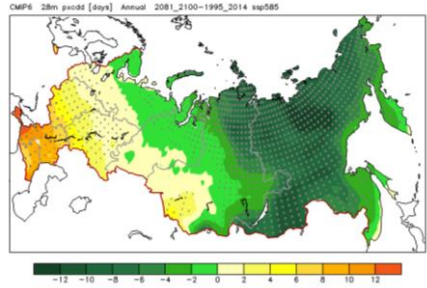
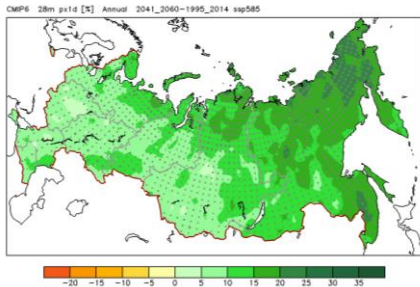


Рис. 16. Изменение средней за 20 лет максимальной продолжительности непрерывных засушливых периодов (т. е. периодов с осадками менее 1 мм/сут.) (дни) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. для сценария SSP5-8.5 по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

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

а)



б)

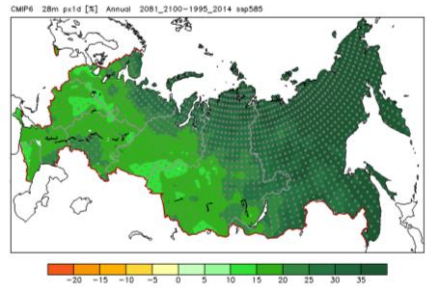


Рис. 17. Изменение средней за 20 лет максимальной за год суточной суммы осадков за один день (%) к середине (а) и концу (б) XXI в. по отношению к периоду 1995–2014 гг. для сценария SSP5-8.5 по оценкам ансамбля из 28 моделей CMIP6.

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

На всей территории Российской Федерации ожидается рост максимальной в году суточной суммы осадков (рис. 17), особенно на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири. В середине и в конце XXI в. рост максимальных осадков в среднем по территории Российской Федерации составит, соответственно, 12 и 27 % относительно базового периода (табл. 4), а для АЗРФ соответствующие оценки достигают 15 и 33 %. При этом на юге Российской Федерации максимальные суммы осадков в XXI в. могут возрасти на фоне уменьшения влагообеспеченности территории в летний сезон (Росгидромет, 2014).

Локальный сток. В качестве характеристики локального стока можно использовать среднее многолетнее значение разности осадков и испарения, рассчитанное по ансамблю моделей СМIP6 (табл. 5 и рис. 18). Как видно (табл. 5), на большинстве водосборов рек (частично или полностью находящихся на территории Российской Федерации) ожидаемые изменения стока к середине XXI в. не превышают межмодельный разброс. Исключение составляют три водосбора — крупные водосборы Лены и Енисея, а также рек северо-востока Азиатской территории России, причем определенность в оценках роста избыточных водных ресурсов возрастает по мере возрастания «агрессивности» сценария антропогенного воздействия на климатическую систему. К концу XXI в. к водосборам, на которых средний рост локального стока превышает межмодельный разброс, по крайней мере для «агрессивного» сценария SSP5-8.5, добавляется еще и совокупность северных рек. Что касается южных рек, то, несмотря на значительный межмодельный разброс на протяжении всего XXI в., в среднем они демонстрируют тенденцию к уменьшению локального стока.

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

Таблица 5

Средние за год изменения годового стока (%) и соответствующие межмодельные стандартные отклонения в середине (2041–2060) и конце (2081–2100) XXI в. по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг., полученные по ансамблям из 32 (33) моделей СМIP6 для разных сценариев радиационного воздействия

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

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

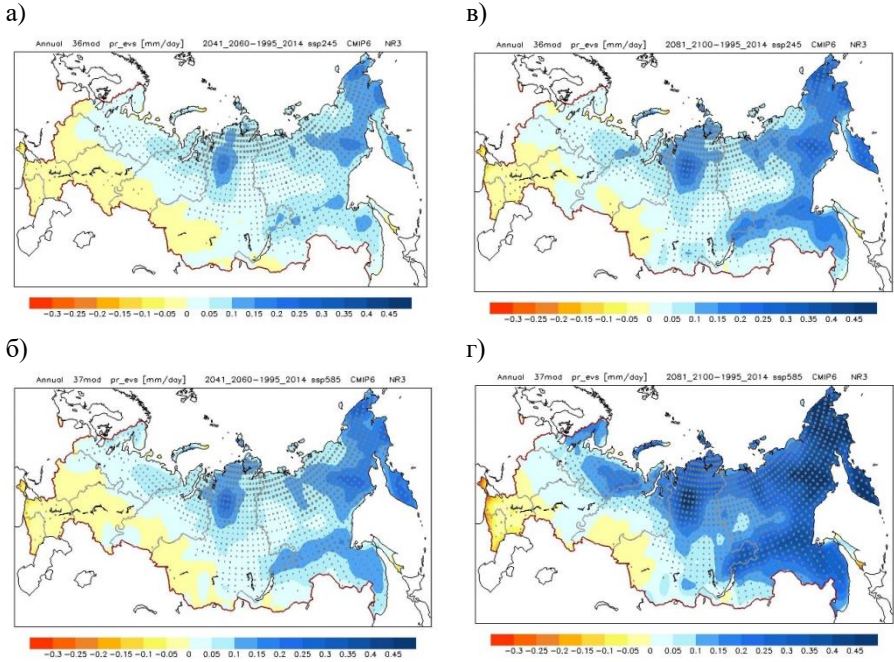


Рис. 18. Изменение средних сезонных разностей осадков и испарения (мм/сут.) в 2041–2061 (а, б) и 2081–2100 гг. (в, г) по отношению к периоду 1995–2014 гг. для сценариев SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) по оценкам ансамблей из 36 и 37 моделей CMIP6 соответственно. Мелкими точками показаны регионы, где более 66 % моделей дают одинаковый знак изменений; крупными — регионы, в которых ансамблевые оценки согласуются по знаку в 90 % моделей

2.3 Криосфера

Снежный покров суши. Оценки будущих изменений снежного покрова суши (СПС), полученные в ансамбле моделей CMIP6, показывают, что площадь СПС на территории Российской Федерации в XXI в. будет сокращаться, причем до середины XXI в. скорость сокращения по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 примерно одинакова (рис. 19). Во второй половине XXI в. для сценария SSP5-8.5 скорость сокращения площади СПС существенно возрастает. Так, к концу

столетия по сценарию SSP2-4.5 сокращение СПС на территории Российской Федерации составит для среднегодовой площади $13 \pm 4\%$ по отношению к среднегодовой площади СПС за период 1995–2014 гг., при реализации сценария SSP5-8.5 среднегодовая площадь СПС сократится на $25 \pm 7\%$. Уменьшение площади СПС в марте составит $5 \pm 3\%$ и $13 \pm 7\%$, в апреле — $13 \pm 6\%$ и $28 \pm 10\%$ для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно.

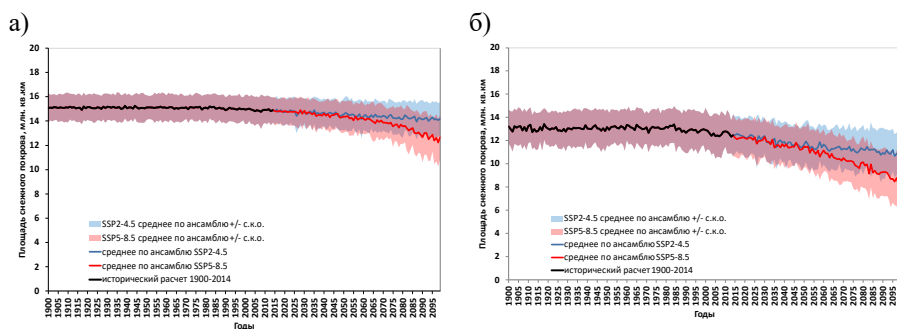


Рис. 19. Эволюция площади снежного покрова (млн км²) в XX–XXI вв. (сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5) для территории Российской Федерации по оценкам ансамбля из 21 модели СМIP6: а) в марте; б) в апреле.

Цветной заливкой показаны средние квадратические отклонения, характеризующие межмодельный разброс в соответствующих ансамблях

Изменения накопленной за зиму массы снега определяются изменениями температуры воздуха и количества осадков в холодный период. В целом, картина изменений массы снега согласуется с ранее полученными оценками. Повышение зимней температуры и увеличение количества зимних осадков приведут к тому, что зимой в более холодных регионах снегонакопление будет увеличиваться, а в менее холодных — уменьшаться, так как часть осадков будет выпадать в виде дождя (Росгидромет, 2014).

Многолетняя мерзлота. Расчеты термического состояния грунтов, проведенные с помощью модели теплопереноса в грунтах (Malevsky-Malevich et al., 2001) с использованием в качестве входных данных результатов моделирования температуры подстилающей поверхности и высоты снежного покрова, полученных в ансамбле

моделей СМIP6, показывают, что при условии реализации сценария SSP5-8.5 к концу XXI в. граница зоны многолетней мерзлоты заметно сместится к северу, кроме того, практически не останется таких областей, в которых приповерхностная мерзлота будет сохраняться во всех модельных расчетах (рис. 20).

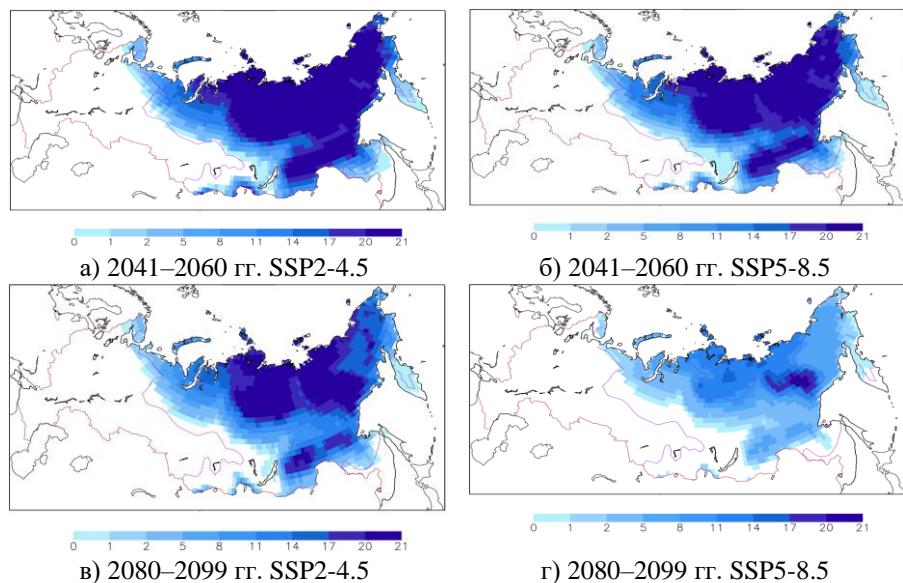


Рис. 20. Площадь, занятая многолетней мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы, для середины и конца XXI в. по данным расчетов по ансамблю из 21 модели СМIP6 по двум сценариям: SSP2-4.5 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г).

Расчеты выполнены для суглинков умеренной влажности.

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

Согласно сценарным прогнозам, площадь, занятая приповерхностной многолетней мерзлотой на территории Российской Федерации, сократится к середине XXI в. по сравнению с базовым

периодом 1995–2014 гг. на $22 \pm 7\%$ для сценария SSP2-4.5 и на $28 \pm 10\%$ для сценария SSP5-8.5, в конце XXI в. сокращение составит $40 \pm 15\%$ и $72 \pm 20\%$ для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно (рис. 21).

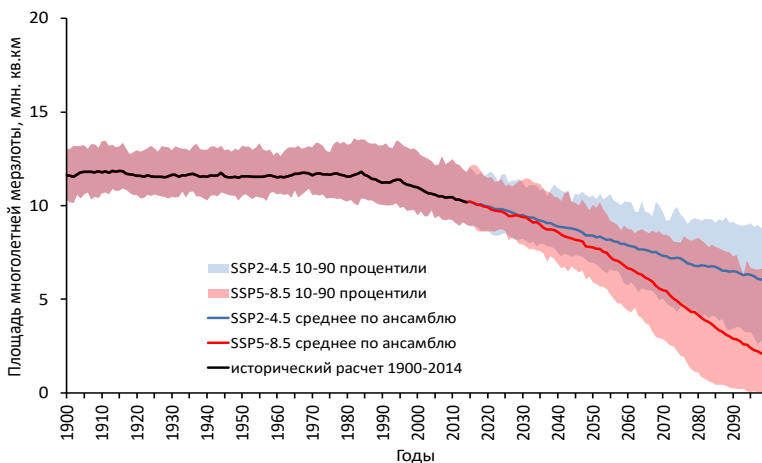


Рис. 21. Эволюция площади, занятой многолетней мерзлотой в верхнем (3,3 м) слое почвы (млн км²) в XX–XXI вв. по оценкам на базе ансамбля из 21 модели CMIP6 (сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5). Цветная заливка — межмодельный разброс в пределах 10-го и 90-го перцентилей в соответствующих ансамблях. Расчеты выполнены для суглинков умеренной влажности

Арктический морской лед. Для сценария SSP1-2.6 площадь морского льда в Арктике практически стабилизируется во второй половине XXI в., хотя и для данного сценария есть модели, по расчетам которых ледяной покров Северного Ледовитого океана становится сезонным уже начиная с середины XXI в. По сравнению с CMIP5 (RCP8.5), в среднем по ансамблю CMIP6 скорость сокращения площади арктического морского льда летом в XXI в. для наиболее «агрессивного» сценария (SSP5-8.5) несколько увеличивается, а межмодельный разброс в ансамбле из 30 моделей уменьшается, хотя и остается по-прежнему значительным.

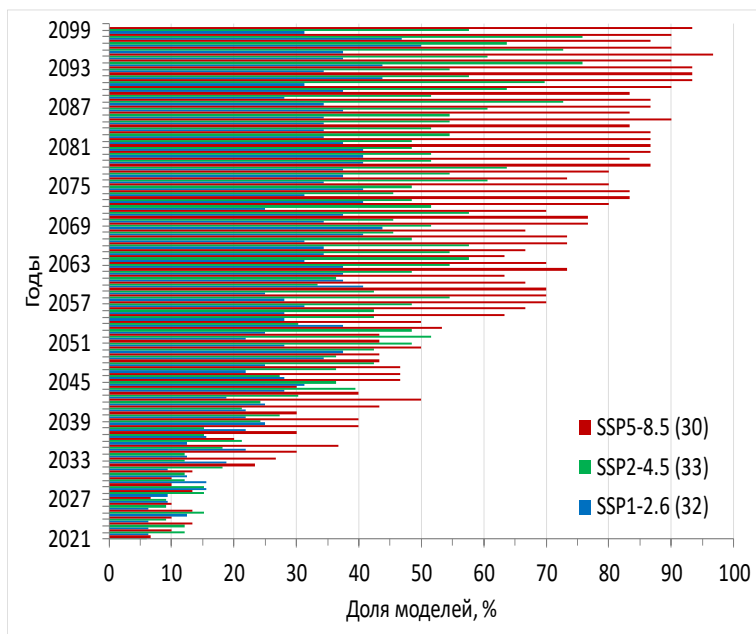


Рис. 22. Доля моделей (в процентах от общего числа моделей в ансамбле) CMIP6, в расчетах которых в сентябре 2021–2099 гг. арктические моря (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) становятся безледными по данным 32 моделей для сценария SSP1-2.6 (синие столбцы), 33 моделей для сценария SSP2-4.5 (зеленые столбцы) и 30 моделей SSP5-8.5 (красные столбцы)

К концу XXI в. в сибирских арктических морях морской лед в годовом минимуме (сентябрь) исчезнет по оценкам подавляющего большинства (90 %) представленных на рис. 22 моделей CMIP6 для сценария SSP5-8.5 и по оценкам примерно двух третей моделей при условии реализации сценария SSP2-4.5. Для сценария SSP1-2.6 лишь примерно в трети моделей морской лед исчезнет в сентябре. При этом в зимний период сокращение площади морского льда в Арктике на протяжении XXI в. не столь велико (ср. рис. 23 а (б) и в (г)).

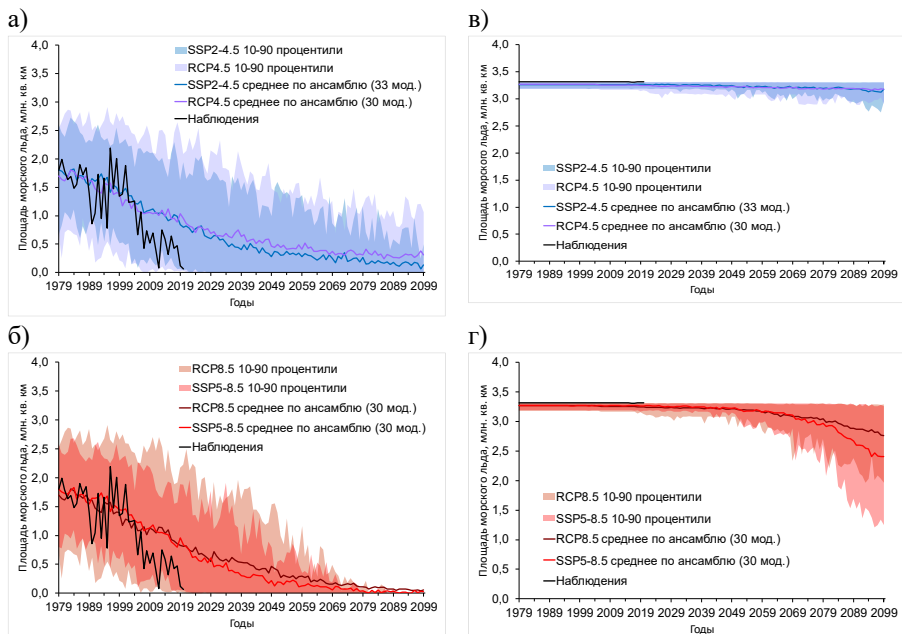


Рис. 23. Эволюция площади морского льда в период 1979–2099 гг. в Сибирских арктических морях (моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) в сентябре (а, б) и марте (в, г) по данным моделей CMIP5 и CMIP6 для сценариев: (а, в) RCP4.5 (30 моделей) и SSP2-4.5 (33 модели); (б, г) RCP8.5 и SSP5-8.5 (по 30 моделей), а также межмодельный разброс в пределах 10-го и 90-го перцентилей. Для периода 1979–2005 гг. для CMIP5 и 1979–2014 гг. для CMIP6 в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный расчет. Для периода 1979–2020 гг. приводится наблюдаемая площадь льда по данным HadISST (Rayner et al., 2003) (черная линия). Площадь морского льда рассчитана как сумма площадей модельных ячеек, в которых среднемесячная концентрация морского льда составляет не менее 15 %

Сравнение средних оценок изменения площади морского льда в сентябре и марте в XXI в., рассчитанных по ансамблю моделей CMIP5 (сценарии RCP4.5, RCP8.5) с соответствующими оценками по ансамблю CMIP6 (сценарии SSP2-4.5, SSP5-8.5) для арктических

морей Российской Федерации (рис. 23) и Северного полушария (рис. 24) указывает на большее сокращение площади морского льда для сценариев SSP. Межмодельный разброс в ансамбле моделей CMIP6 меньше (за исключением оценок площади морского льда в марте в конце XXI в.).

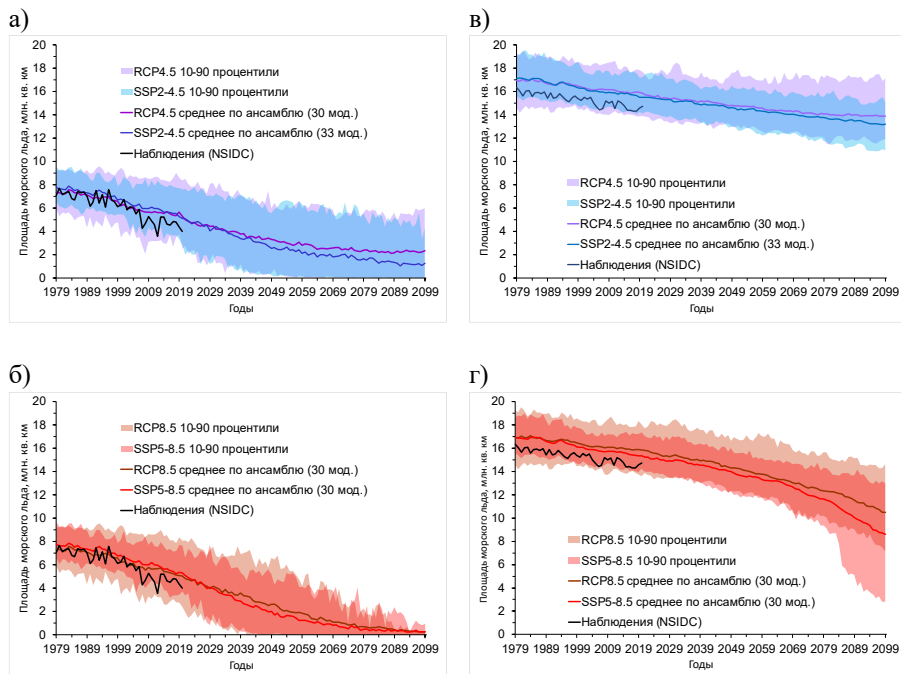


Рис. 24. Эволюция площади морского льда в период 1979–2099 гг. в Северном полушарии в сентябре (а, б) и в марте (в, г) по данным моделей CMIP5 и CMIP6 для сценариев: (а, в) RCP4.5 (30 моделей) и SSP2-4.5 (33 модели); (б, г) RCP8.5 и SSP5-8.5 (по 30 моделей), а также межмодельный разброс в пределах 10-го и 90-го процентилей.

Для периода 1979–2020 гг. приводится наблюдаемая площадь льда по данным NSIDC (Fetterer et al., 2017) (черная линия). Площадь морского льда рассчитана как сумма площадей модельных ячеек, в которых среднемесячная концентрация морского льда составляет не менее 15 %

Заключение

Влияние глобального потепления на климат Российской Федерации в XXI в. будет выражаться в формировании в большинстве регионов все более теплого и влажного климата. Повышение средних зимних температур и рост количества осадков в традиционно «холодных» районах страны (северный Урал, Центральная и Восточная Сибирь) повлекут за собой увеличение весеннего снегозапаса и, как следствие, осложнят паводковую обстановку на водосборах крупнейших рек в период снеготаяния. В южной части территории Российской Федерации ожидается нарастание засушливости и усиление влияния экстремально высоких температур и экстремальных осадков в летний период. Деградация многолетней мерзлоты и сокращение морского ледяного покрова в Арктике способны оказать существенное воздействие на экосистемы, экономику страны и условия жизни людей, прежде всего в АЗРФ.

В целом, согласно расчетам с моделями CMIP6 для сценариев семейства SSP, оценки ожидаемых изменений климата на территории Российской Федерации в XXI в. качественно согласуются с оценками, полученными ранее (см. Росгидромет, 2008; 2014) для сценариев SRES (Nakićenović et al., 2000) и RCP (van Vuuren et al., 2011). Все это указывает на высокую степень «робастности» оценок изменений климата на территории России. Несмотря на неопределенности, связанные с естественной изменчивостью климатической системы, а также с несовершенством климатических моделей, проявляющимся в том числе в демонстрируемых ими систематических погрешностях и межмодельном разбросе, полученные оценки будущих изменений климата, в том числе на территории Российской Федерации, удовлетворительно согласуются с данными наблюдений за исторический период модельных расчетов, и их достоверность вызывает все меньше сомнений.

Вместе с тем, вопрос применимости полученных на основе расчетов с глобальными моделями оценок будущих региональных изменений климата в практических целях, в том числе при планировании тех или иных мер адаптации к изменениям климата

в отраслевом и региональном разрезах, по-прежнему остается актуальным. Во многих случаях даже для одних и тех же сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему разброс модельных результатов для территории Российской Федерации существенно превышает средние по ансамблю изменения. Из-за неопределенностей оценок будущих изменений климата, связанных помимо прочего, с недостатком вычислительных ресурсов, выводы о последствиях изменения климата и адаптационных мероприятиях носят зачастую качественный характер и не могут обеспечить решение многих задач управления рисками, что необходимо для устойчивого развития экономики (Катцов, 2015).

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

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

Исследование выполнено при поддержке Росгидромета в рамках направления 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций».

Авторы признательны Программе диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) посредством Рабочей группы

по объединенным моделям (WGCM), осуществившей координацию и продвижение CMIP6. Мы благодарим участников климатических модельных групп за создание и предоставление результатов расчетов по моделям, Международную организацию научных порталов по земной системе (ESGF) за архивацию и организацию доступа к данным и многочисленные организации, оказывающие финансовую поддержку CMIP6 и ESGF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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

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

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

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

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

Росгидромет (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1,2 / под ред. А.И. Бедрицкого [и др.]. — М.: Росгидромет. 230 и 291 с.

Росгидромет (2014). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. — М.: Росгидромет. 1009 с.

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

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

CRU-4 (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / Harris I., Osborn T. J., Jones P. [et al.] // *Sci. Data*. V. 7. P. 109. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

DEL (2001). Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950–1999) / Willmott C. J., Matsuura K. / Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware. URL: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.gchn_ts2.html.

ERA-5 (2020). The ERA5 global reanalysis / Hersbach H., Bell B., Berrisford P. [et al.] // *Q J R Meteorol Soc*. V. 146. P. 1999–2049. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

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

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

Fetterer F., Knowles K., Meier W. N., Savoie M., Windnagel A. K. (2017). Sea ice index, version 3 (updated daily) // NSIDC: National Snow and Ice Data Center. Boulder. Colorado USA. URL: <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>.

Hawkins E., Sutton R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions // *Bull. Am. Meteorol. Soc*. V. 90. P. 1095–1108. DOI: 10.1175/2009BAMS2607.1.

Herger N., Abramowitz G., Knutti R., Angéilil O., Lehmann K., Sanderson B. M. (2018). Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties // *Earth Syst. Dyn.* V. 9. P. 135–151.

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

Knutti R., Sedláček J., Sanderson B. M., Lorenz R., Fischer E. M., Eyring V. (2017). A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence // *Geophys. Res. Lett.* V. 44. P. 1909–1918. DOI: 10.1002/2016GL072012.

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

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

Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., Shklyarevich O. B. (2001). Numerical simulation of permafrost parameters distribution // *Cold Regions Sci. and Technol.* № 32. P. 1–11.

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

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

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

Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. V. 463. P. 747–756.

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

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

NCEP/NCAR (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 77. P. 437–470.

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

Olson R., An S.-I., Fan Y., Evans J. P., Caesar L. (2018). North Atlantic observations sharpen meridional overturning projections // *Clim. Dyn.* V. 50. P. 4171–4188. DOI: 10.1007/s00382-017-3867-7.

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

O'Neill B., Carter T., Ebi K., Harrison P., Kemp-Benedict E., Kok K., Kriegler E., Preston B., Riahi K., Sillmann J., van Ruijven B., van Vuuren D., Carlisle D., Conde C., Fuglestedt J., Green C., Hasegawa T., Leininger J., Monteith S., Pichs-Madruga R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework // *Nature Climate Change*. V. 10 (12). P. 1074–1084. DOI: 10.1038/s41558-020-00952-0.

Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night

marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* V. 108. № D14. 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670.

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

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

Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin of the American Meteorological Society.* V. 93. P. 485–498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Tebaldi C., Debeire K., Eyring V., Fischer E., Fyfe J., Friedlingstein P., Knutti R., Lowe J., O'Neill B., Sanderson B., van Vuuren D., Riahi K., Meinshausen M., Nicholls Z., Tokarska K. B., Hurtt G., Kriegler E., Lamarque J.-F., Meehl G., Moss R., Bauer S. E., Boucher O., Brovkin V., Byun Y.-H., Dix M., Gualdi S., Guo H., John J. G., Kharin S., Kim Y., Koshiro T., Ma L., Olivie D., Panickal S., Qiao F., Rong X., Rosenbloom N., Schupfner M., Séférian R., Sellar A., Semmler T., Shi X., Song Z., Steger C., Stouffer R., Swart N., Tachiiri K., Tang Q., Tatebe H., Voltaire A., Volodin E., Wyser K., Xin X., Yang S., Yu Y., Ziehn T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6 // *Earth Syst. Dynam.* V. 12. P. 253–293.

Tokarska K. B., Stolpe M. B., Sippel S., Fischer E. M., Smith C. J., Lehner F., Knutti R. (2020). Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models // *Sci. Adv.* V. 6. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9549>.

van Vuuren D. P., Riahi K., Moss R., Edmonds J., Thomson A., Nakicenovic N., Kram T., Berkhout F., Swart R., Janetos A., Rose S. K., Arnell N. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities // *Global Environ. Chang.* V. 22. P. 21–35.

van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N.,

Smith S. J., Rose S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview // *Climatic Change*. V. 109 (1). P. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

Weigel A. P., Knutti R., Liniger M. A., Appenzeller C. (2010). Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections // *J. Climate*. V. 23. P. 4175–4191. DOI: 10.1175/2010JCLI3594.1.

Zelinka M. D., Myers T. A., McCoy D. T., Po-Chedley S., Caldwell P. M., Ceppi P., Klein S. A., Taylor K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models // *Geophys. Res. Lett.* V. 47. P. 1–12. DOI: 10.1029/2019gl085782.

МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА CMIP6

Горизонтальное разрешение атмосферного и океанского компонентов МОЦАО характеризуется шагом сетки в градусах широты/долготы или в виде спектрального усечения (в атмосфере).
Вертикальное разрешение (L) определяется количеством уровней

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
1	CSIRO-ARCCSS, Австралия	ACCESS-CM2, 2019	MetUM-HadGEM3-GA7.1 N96) L85, 192 × 144	ACCESS-OM2 (GFDL-MOM5) L50, 360 × 300
2	CSIRO, Австралия	ACCESS-ESM1.5, 2019	HadGAM2 (r1.1, N96) L38, 192 × 145	ACCESS-OM2 (MOM5) L50, 360 × 300
3	AWI, Германия	AWI-CM-1.1 MR, 2018	ESMAM6.3.04p1 T127 (0.9° × 0.9°)L95, 384 × 192	FESOM1.4 неравномерная сетка (1°×0.2~0.6°) L46
4	BCC, Китай	BCC-CSM2-MR, 2017	BCC_AGCM3_MR T106 (0.8° × 0.8°)L46, 320 × 160	MOM4 (1° × 0.3°~1.0°) L40, 360 × 300
5	CCCMAECC, Канада	CanESM5, 2017	CanAM5 T63(1.9° × 1.9°)L49, 192 × 96	NEMO3.4.1(ORCA1,1°×0.3°~1.0°) L40, 362 × 292

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
6	CCCMAЕСС, Канада	CanESM5-CanOE, 2019	CanAM5 T63(1.9° × 1.9°)L49, 192 × 96	NEMO3.4.1(ORCA1,1°×0.3°~1.0°) L45, 360 × 291
7	CAMS, Китай	CAMS-CSM1-0, 2016	ECHAM5_CAMS T106 (0.8° × 0.8°)L31, 320 × 160	MOM4 (1° × 0.3-1.0°) L50, 360 × 200
8	NCAR, США	CESM2, 2017	CAM6 (0.9° × 1.25°) L32, 288 × 192	POP2(1.1° × 0.3~0.6°) L60, 320 × 384
9	NCAR, США	CESM2-WACCM, 2017	CAM6 (0.9°×1.25°) L70, 288 × 192	POP2(1.1°×0.3~0.6°) L60, 320 × 384
10	CMCC, Италия	CMCC-CM-SR5, 2016	CAM5.3(0.9°×1.25°)L30, 288 × 192	NEMO3.6,ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L50, 362 × 292
11	CNRM, Франция	CNRM-CM6-1, 2017	Arpege 6.3 (TL127 (1.4°×1.4°)L91,128 × 256	NEMO3.6,ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362 × 294
12	CNRM, Франция	CNRM-ESM2-1, 2017	Arpege 6.3 (TL127 (1.4°×1.4°)L91,128 × 256	NEMO3.6,eORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362 × 294
13	CNRM, Франция	CNRM-CM6-1 HR, 2017	Arpege 6.3 (TL 359 L91 720 × 360	NEMO3.6 eORCA025 (0.25° × 0.25°) L75, 1442 × 1050

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
14	ICHEC, ЕС	EC-EARTH3, 2019	IFScy36r4(TL255 (~0.7°×~0.7°)L91, 512 × 256	NEMO3.6,ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362 × 292
15	ICHEC, ЕС	EC-EARTH3-Veg, 2019	IFScy36r4(TL255, (~0.7°×~0.7°)L91, 512 × 256	NEMO3.6,ORCA1deg(~1°×1~0.3°) L75, 362 × 292
16	CAS, Китай	FGOALS-f3-L, 2017	FAMIL2.2, C96(1°×1°)L32, 360 × 180	LICOM3.0,триполярная сетка (1°×1°)L30, 360 × 218
17	CAS, Китай	FGOALS-g3, 2017	GAMIL2 (2°×2°)L32, 180 × 90	LICOM3.0,триполярная сетка (1°×1°)L30, 360 × 218
18	FIO-QLNM, Китай	FIO-ESM 2.0, 2018	CAM4 (0.9°×1.25°) L26, 192 × 288	POP2-W (POP2 + MASNUM) L60, 320 × 384
19	GFDL, США	GFDL-CM4, 2018	GFDL-AM4.0.1 C96(1°×1°)L33, 288 × 180	GFDL-OM4p5 (GFDL-MOM6, (номинально 0.25°)L75, 1440 × 1080
20	GFDL, США	GFDL-ESM4, 2018	GFDL-AM4.1 C96(1°×1°)L49, 360 × 180	GFDL-OM4p5 (GFDL-MOM6 (номинально 0.5°)L75, 720 × 576

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
21	NASA, США	GISS-E2-1-G, 2016	GISS-E2.1 (2.5°×2°) L40, 144 × 90	GISS Ocean (1.25°×1°)L32, 288 × 180
22	NIMR/КМА, Корея	HadGEM3-GC31-LL, 2016	MetUM-HadGEM3-GA7.1(N961.875°×1.5)L85, 192 × 144	NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA1(1°×0.3~1°)L75, 360 × 330
23	МОНС, СК	HadGEM3-GC31-MM, 2016	MetUM-HadGEM3-GA7.1(N216~0.6°×~0.8)L85, 432 × 324	NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA025 триполярная сетка ~ 0.25°) L75, 1440 × 1205
24	INM, Россия	INM-CM4-8, 2016	INM-AM4-8 (2°×1.5°) L21, 180 × 120	INM-OM5 (~1°×~1°) L 40, 360 × 318
25	INM, Россия	INM-CM5-0, 2016	INM-CM5-0 (2°×1.5°) L73, 180 × 120	INM-OM5 (0.5°×0.25°) L40, 720 × 720
26	IPSL, Франция	IPSL-CM6A-LR, 2017	LMDZ4 (NPv6, N96 1.9°×3.75°)L79 144 × 143	NEMO-OPA (eORCA1.3, 1°~1.0°)L75,362 × 332
27	NIMS-КМА, Корея	KACE1.0-G, 2018	MetUM-HadGEM3-GA7.1 (N96)L85, 192 × 144	MOM4p1 (триполярная сетка ~1°)L50, 360 × 200

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
28	UA, США	MCM-UA-1-0, 1991	R30L14 (3.75° × 2.5°)L14, 96 × 80	MOM1.0 (MOM1, 1.875° × 2.5°)L18, 192 × 80
29	JAMSTEC/AORI/R-CCS, Япония	MIROC6, 2017	CCSR AGCM(T85 1.4°×1.4°)L81, 256 × 128	COCO4.9 (t 1°×1°)L63, 256 × 360
30	JAMSTEC/AORI/R-CCS, Япония	MIROC-ES2L, 2018	CCSR AGCM (T42 2.8°×2.8°)L40, 128 × 64	COCO4.9 (триполярная сетка ~1°×~1°)L63, 256 × 360
31	DKRZ, Германия	MPI-ESM1.2-HR, 2017	ECHAM6.3 (T127 0.9°×0.9°)L95, 384 × 192	MPIOM1.63 (триполярная сетка TP04, ~ 0.4° × ~0.4°)L40, 802 × 404
32	DKRZ, Германия	MPI-ESM1.2-LR, 2017	ECHAM6.3 (T63 1.9°×1.9°)L47, 192 × 96	MPIOM1.63 (биполярная сетка ~1.5°) L40, 256 × 220
33	MRI, Япония	MRI-ESM2-0, 2017	MRI-AGCM3.5 (TL159 1.1°×1.1°)L80, 320 × 160	MRI.COM4.4 (триполярная сетка ~1°×~0.5°)L61, 360 × 364
34	NUIST, Китай	NESM3 v3, 2016	ECHAM v3.6 T63 (1.9°×1.9°)L47, 192 × 96	NEMO v3.4 (~1°×0.3° ~1.0°)L46, 362 × 384

№	Научная организация, страна	Индекс модели, год ее создания	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
35	NCC, Норвегия	NorESM2-LM, 2017	CAM-OSLO (2.5°×1.9°)L32, 144 × 96	MICOM (~0.9°×1~0.5°)L70, 384 × 360
36	NCC, Норвегия	NorESM2-MM, 2017	CAM-OSLO (1°×1°)L32, 288 × 192	MICOM (~0.9°×1~0.5°)L70, 384 × 360
37	МОИС, СК	UKESM1-0-LL, 2018	MetUM-HadGEM3GA7.1 (N96 8.75°×1.25°)L85, 192 × 144	NEMO-HadGEM3-GO6.0 (eORCA1deg(~1°×1~0.3°)L75, 360 × 330

**ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ОКРУГА РОССИИ:
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ЭКОНОМИКА**

*И. М. Школьник¹, Е. М. Акентьева¹, М. В. Клюева¹,
В. В. Стадник¹, Е. И. Хлебникова¹, Д. В. Фасолько¹,
Е. Н. Разова¹, Ю. Л. Рудакова¹, В. Н. Павлова²*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

² Всероссийский научно-исследовательский
институт сельскохозяйственной метеорологии
249038 Обнинск, пр. Ленина, 82

National Research Institute of Agricultural Meteorology
249038 Obninsk, Lenin ave., 82

E-mail: igor@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 1.03.2022

Поступила после доработки 19.04.2022

Введение

Глобальному потеплению сопутствует целый комплекс междисциплинарных проблем, охватывающих экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития как Российской Федерации в целом, так и каждого федерального округа. Происходящие изменения климата, которые проявляются не только в увеличении повторяемости и интенсивности опасных метеорологических явлений, но и в медленных изменениях климатических характеристик, по-разному воздействуют на сферы жизнедеятельности и экономику в регионах России в силу ее большой территории и многообразия природных зон. В этой связи в последнее

десятилетие в России, как и во всем мире, повышенное внимание уделяется разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата, а также национальных и региональных адаптационных программ и планов.

Цель адаптации — уменьшение ущерба от климатических воздействий и использование благоприятных возможностей, которые могут возникнуть при изменении климата.

Фундаментом адаптации, наиболее значимые мероприятия которой направлены на снижение неблагоприятных последствий климатических изменений, служит система базовой и специализированной климатической информации для различных секторов экономики, социальной сферы и природных систем. Такая информация обеспечивается глобальной системой наблюдения за климатом и современными климатическими моделями, прогнозирующими возможные в будущем изменения глобального и регионального климата при разных сценариях эмиссий парниковых газов и аэрозолей в атмосфере.

Для разработки стратегии адаптации к изменению климата, как на общероссийском, так и на уровне субъекта, используется информация о комплексах погодно-климатических рисков. Чтобы качественно или количественно оценить величину риска, необходимо иметь информацию о метеорологических и климатических характеристиках и их изменениях на рассматриваемой территории, а также данные о подверженности находящихся на ней объектов неблагоприятному воздействию окружающей среды и их уязвимости к этому воздействию. Стержнем адаптационной стратегии для отраслей технической сферы является актуализация соответствующих нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации инфраструктурных объектов (СП, ГОСТ и др.), которые включали бы информацию о наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменениях.

Информационно-аналитической основой для разработки планов адаптации отраслей экономики и социальной сферы на региональном уровне являются отраслевые планы адаптации, подготовленные соответствующими министерствами для территории Российской

Федерации (Минэнерго, Минтранс, Минсельхоз, Минздрав и др.), и Типовой паспорт климатической безопасности, представленный на сайте Климатического Центра Росгидромета ([http://cc.voeikovmgo.ru /images/dokumenty/2021/tpkb.pdf](http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/tpkb.pdf)).

При переходе на уровень федерального округа формирование и реализация адаптационных мер, разработанных на отраслевом уровне, требуют значительной корректировки с учетом, как отмечено выше, местных климатических, гидрологических, физико-географических и социально-экономических условий, а также степени уязвимости объектов местной инфраструктуры. Основные направления секторальной адаптации должны быть учтены на уровне федеральных округов и субъектов Российской Федерации, чтобы не возникали нестыковки и противоречия в подходах к этому вопросу между соседними регионами и появилась возможность адаптировать к климатическим изменениям экономику в масштабах всей страны. Здесь особую важность приобретает мониторинг заранее определенных количественных индикаторов результатов адаптационного процесса на местном, секторальном, региональном и национальном уровнях.

Данная статья посвящена детальному анализу наблюдаемых и прогнозируемых воздействий климатических ресурсов на экономику федеральных округов. Приводятся описание и обзор состояния дел в условиях изменяющегося климата в области добывающей промышленности и в основных приоритетных направлениях климатического обслуживания: в сфере сельского хозяйства, здравоохранения, водных ресурсов, энергетики, строительства, транспорта, туризма.

1 Особенности изменений климата на территориях округов

1.1 Температура и осадки по данным наблюдений

Дальневосточный федеральный округ. Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории ДФО (рис. 1а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха во Владивостоке возросла примерно на 2, в Анадыре на 3, а в Якутске — на 4 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Увеличение годовых сумм осадков в южной и восточной частях ДФО (рис. 1б) обусловлено возрастанием количества осадков и в холодный, и в теплый периоды года. На севере округа осадки увеличивались в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества это не отразилось на изменении годовых сумм.

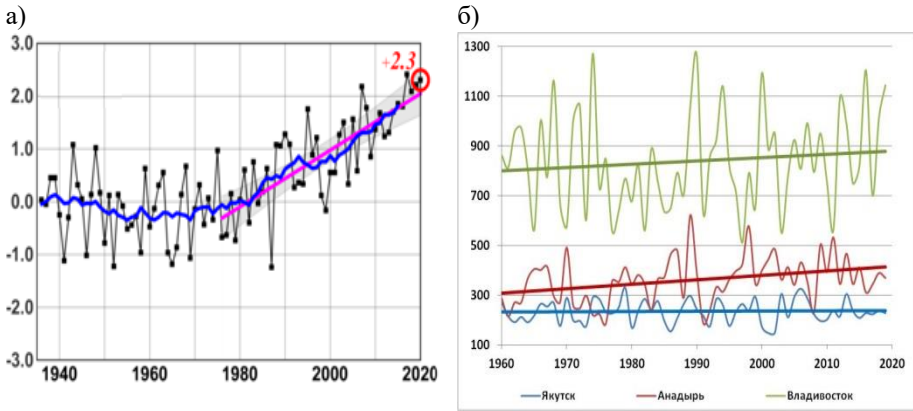
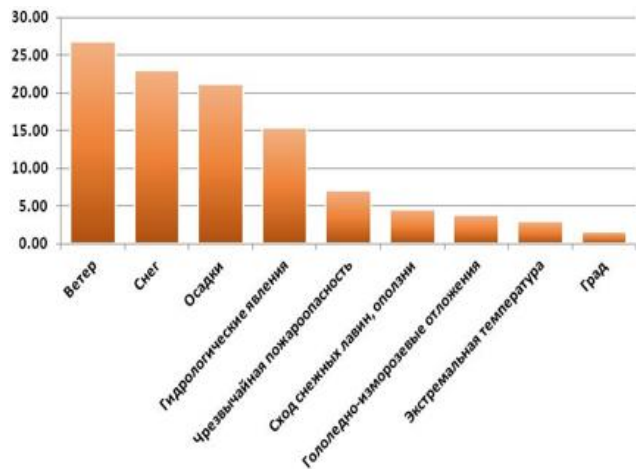


Рис. 1. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, °С, осредненные по территории ДФО, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, в период 1960–2020 гг. на станциях Якутск, Анадырь, Владивосток (б)

В последние десятилетия в ДФО увеличилась повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, связанных чаще всего с экстремальными скоростями ветра и количеством осадков, а также высокой степенью пожароопасности (рис. 2).

а)



б)

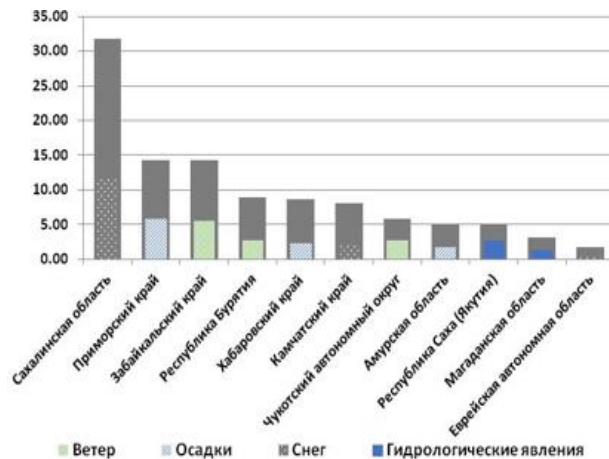


Рис. 2. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) ДФО; б) отдельных субъектов ДФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Приволжский федеральный округ. Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ПФО (рис. 3а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Нижнем Новгороде возросла на 2,5, в Перми и Оренбурге — на 2 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года, однако наиболее заметно он был выражен в холодный период. На севере и в центре ПФО наблюдалось существенное увеличение годового количества осадков (рис. 3б). На юге округа количество осадков, наоборот, снижалось, особенно в теплый период.

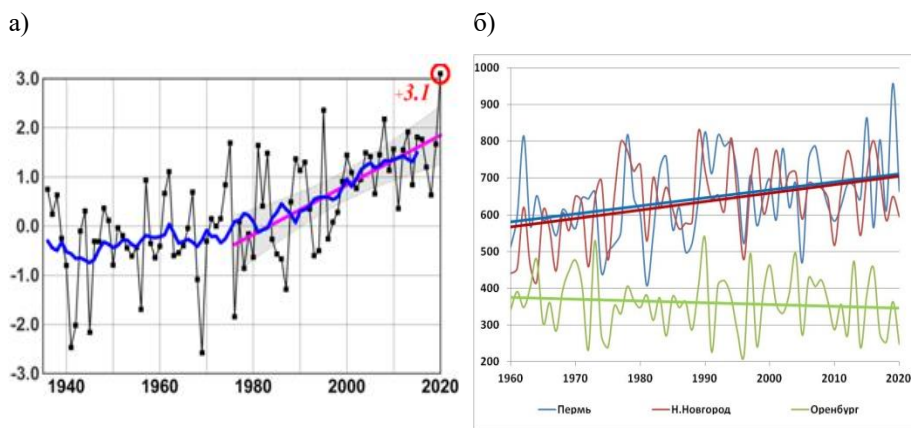


Рис. 3. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории ПФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Пермь, Нижний Новгород, Оренбург (б)

В последнее 30-летие на территории ПФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными температурами, высокой степенью пожароопасности (рис. 4).

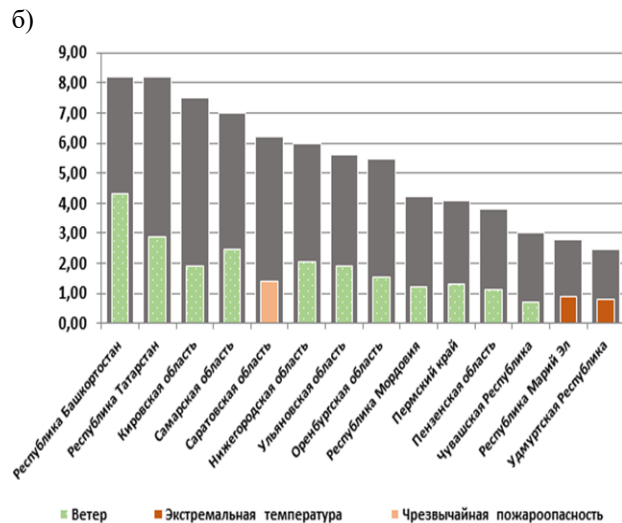
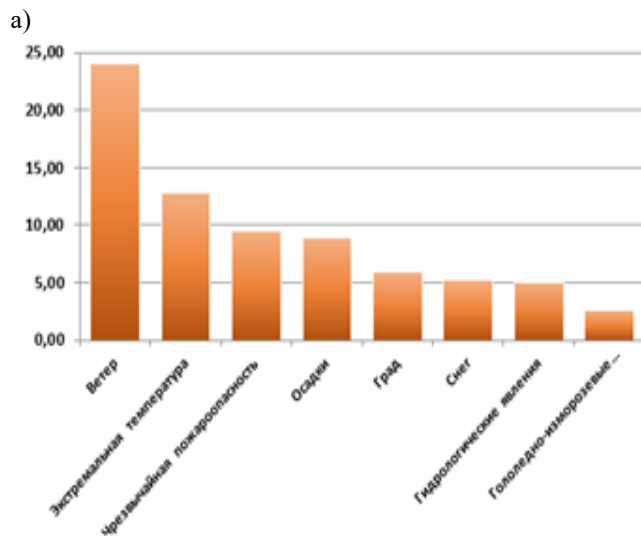


Рис. 4. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) ПФО; б) отдельных субъектов ПФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Северо-Западный федеральный округ. Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории СЗФО (рис. 5а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Мурманске и Сыктывкаре возросла примерно на 2, а в Пскове — на 2,5 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года, однако наиболее заметно он выражен в холодный период. Увеличение как годового количества осадков (рис. 5б), так и сумм осадков в различные сезоны года характерно для всей территории СЗФО.

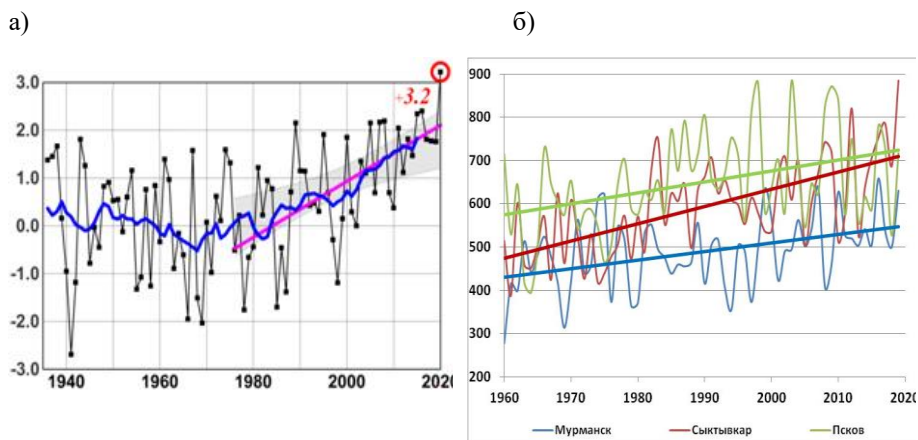
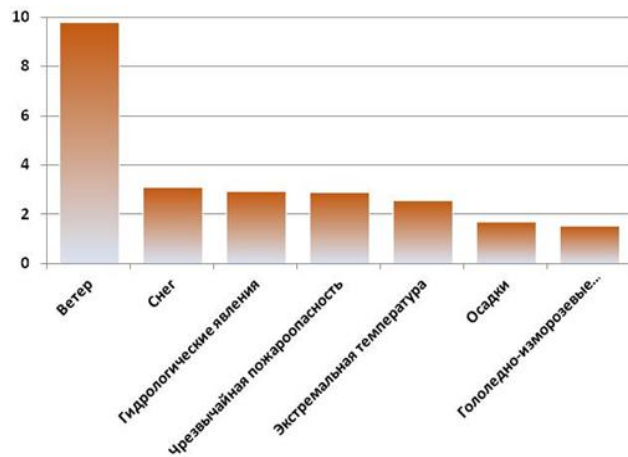


Рис. 5. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории СЗФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Мурманск, Сыктывкар, Псков (б)

В последнее 30-летие на территории СЗФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными снегопадами, наводнениями, высокой пожароопасностью (рис. 6).

а)



б)

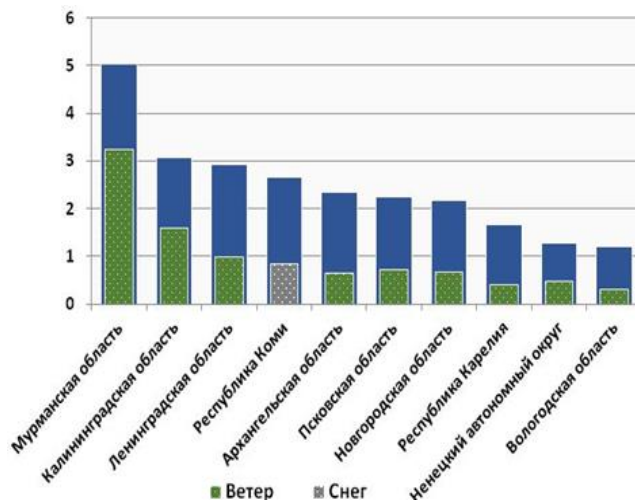


Рис. 6. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) СЗФО; б) отдельных субъектов СЗФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Северо-Кавказский федеральный округ. Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории СКФО (рис. 7а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Махачкале возросла на 1, в Минеральный Водах и Нальчике — на 2 °С. Рост температуры наблюдался как в теплый, так и в холодный периоды года. На территории округа отмечалось небольшое увеличение годовых сумм осадков (рис. 7б). Однако на фоне большой межгодовой изменчивости этого показателя такой тренд не является значимым.

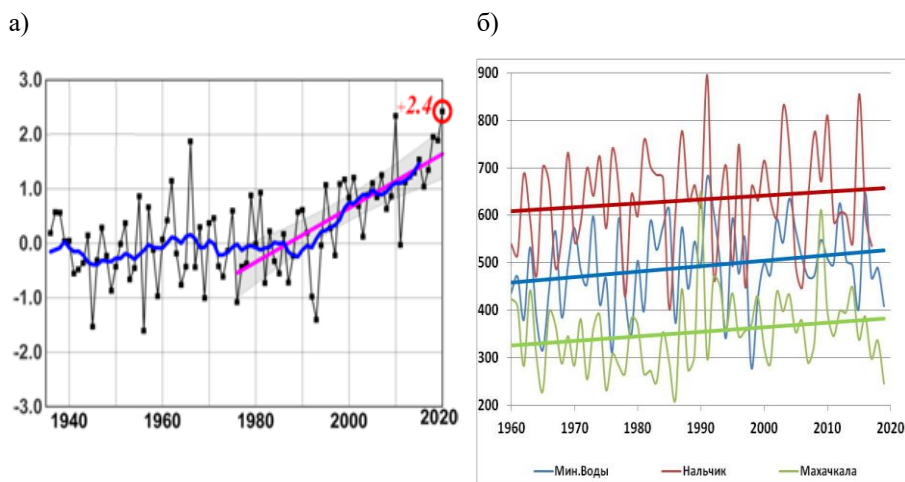


Рис. 7. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, усредненные по территории СКФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Минеральные Воды, Нальчик, Махачкала (б)

В последнее 30-летие на территории СКФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с экстремальными осадками, наводнениями, градом (рис. 8).

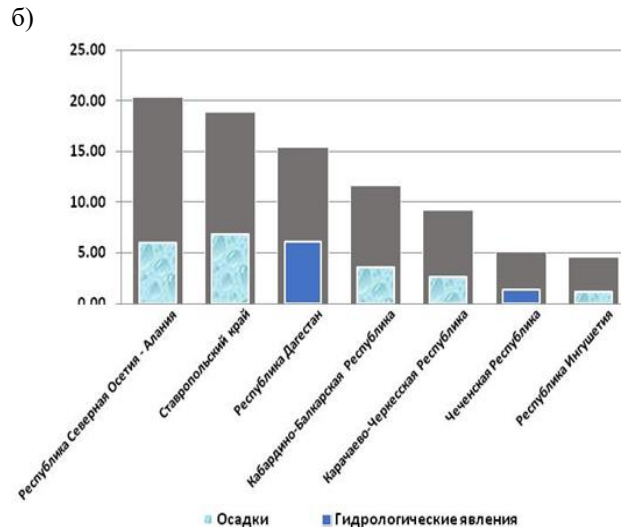
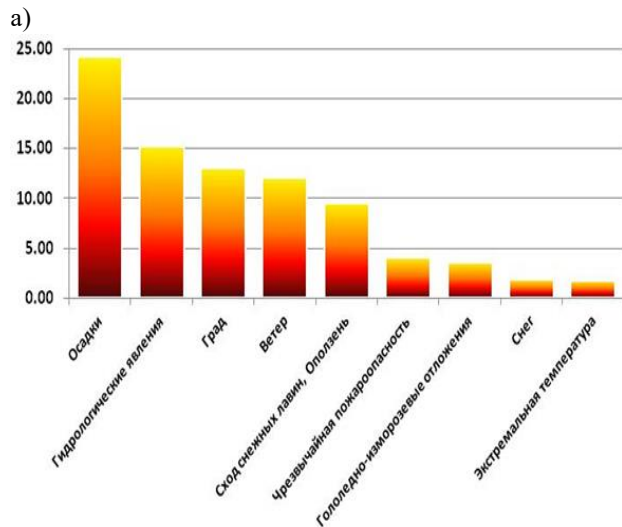


Рис. 8. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) СЗФО; б) отдельных субъектов СЗФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Сибирский федеральный округ. Повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории СФО (рис. 9а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Хатанге возросла примерно на 3, в Иркутске — на 2,5, в Новосибирске — на 2°С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Осадки увеличились в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества это существенно не отразилось на изменении годовых сумм (рис. 9б).

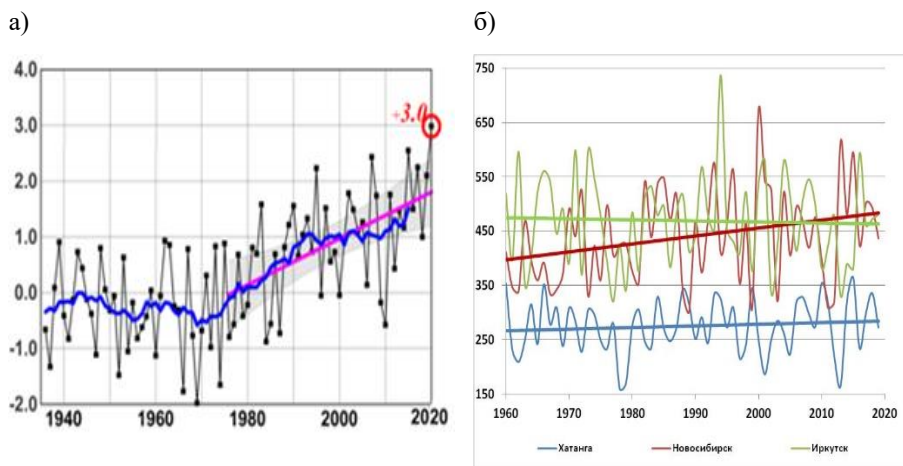
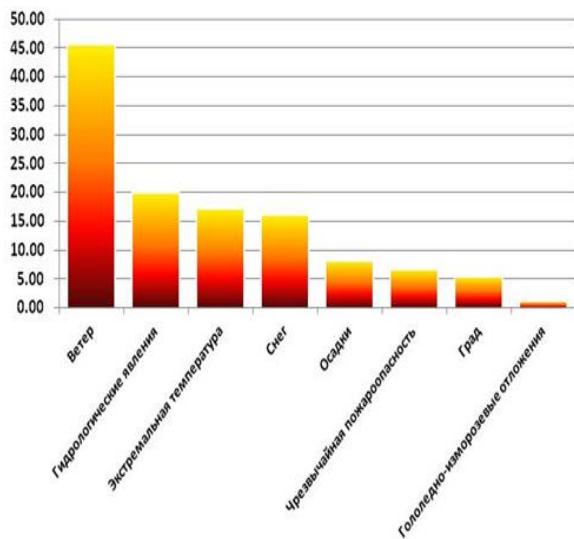


Рис. 9. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории СФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Хатанга, Новосибирск, Иркутск (б)

В последнее 30-летие на территории СФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, наводнениями, экстремальными температурами (рис. 10).

а)



б)

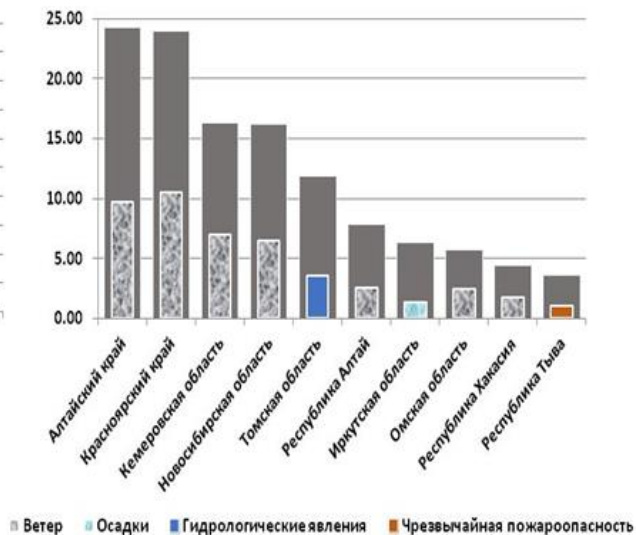
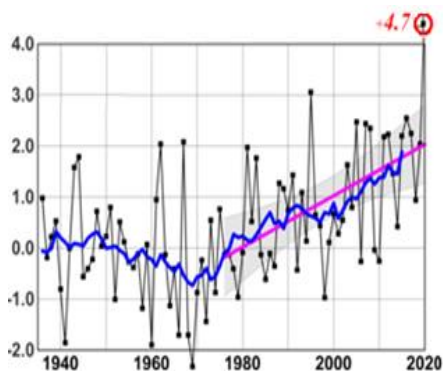


Рис. 10. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) СФО; б) отдельных субъектов ЗФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Уральский федеральный округ. Повышение температуры воздуха наблюдается на всей территории УФО (рис. 11а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Салехарде возросла примерно на 3, в Ханты-Мансийске и Екатеринбурге — на 2 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Увеличение сумм осадков и в теплый, и в холодный периоды года наиболее выражено в северной части УФО (рис. 11б). На юге округа количество осадков увеличилось преимущественно в холодный период.

а)



б)

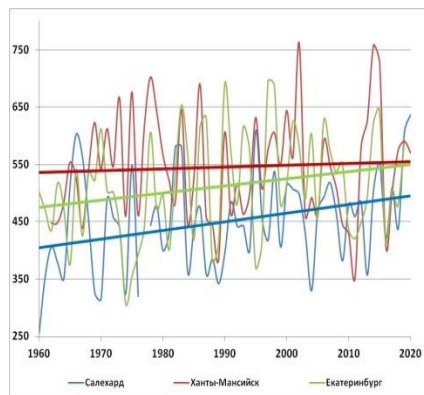
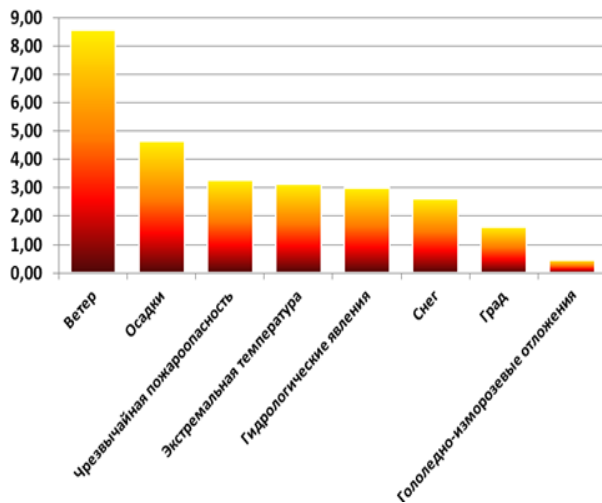


Рис. 11. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории УФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Салехард, Ханты-Мансийск, Екатеринбург (б)

В последнее 30-летие на территории УФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными осадками и пожароопасностью (рис. 12).

а)



б)

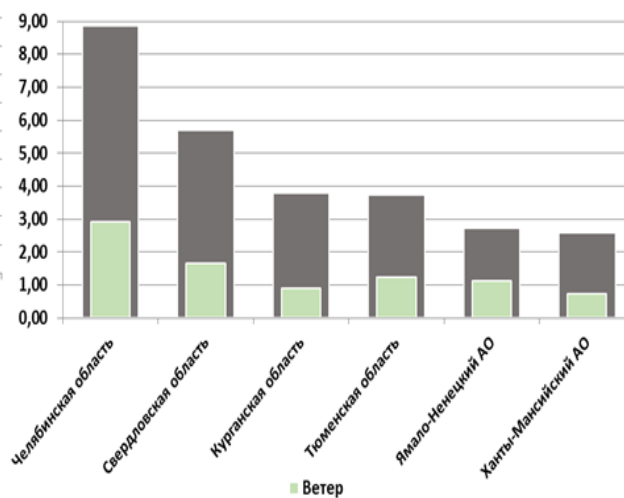


Рис. 12. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) УФО; б) отдельных субъектов УФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Центральный федеральный округ. Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ЦФО (рис. 13а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Смоленске и Воронеже возросла примерно на 2,5, в Рыбинске — на 2 °С. В наибольшей степени рост температуры был выражен в холодный период года. Увеличение годового количества осадков на севере ЦФО (рис. 13б) обеспечивалось в основном за счет сумм осадков в холодный период года.

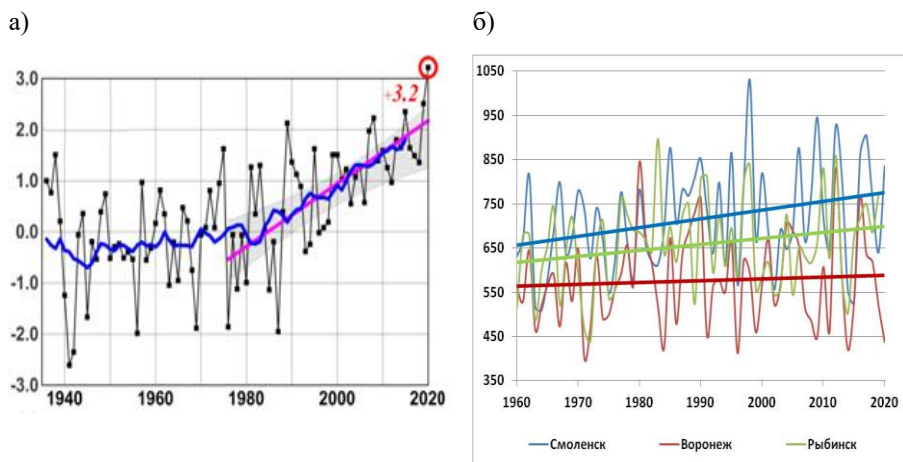
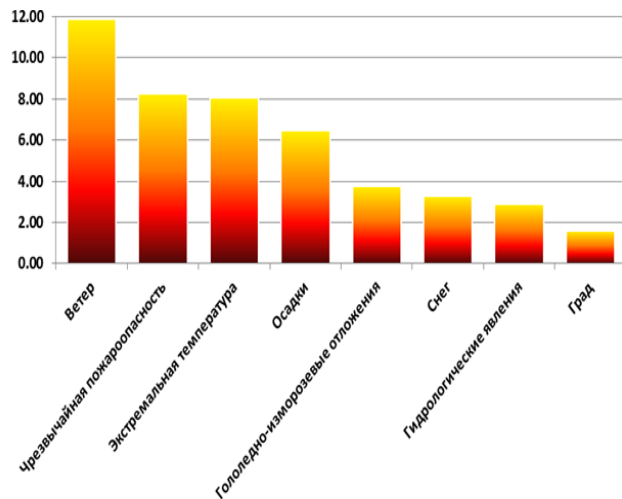


Рис. 13. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории ЦФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Смоленск, Воронеж, Рыбинск (б)

В последнее 30-летие на территории ЦФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, высокой степенью пожароопасности, экстремальными температурами (рис. 14).

а)



б)

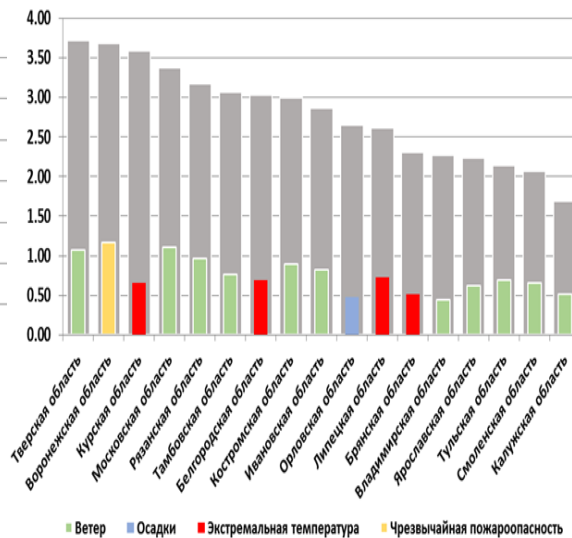


Рис. 14. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) ЦФО; б) отдельных субъектов ЦФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

Южный федеральный округ. Повышение температуры воздуха происходит в среднем на всей территории ЮФО (рис. 15а). В период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Ростове-на-Дону возросла примерно на 1,5, в Астрахани и Симферополе — на 2 °С. Рост температуры наблюдался как в теплый, так и в холодный периоды года. Значимых трендов годовых сумм осадков на территории ЮФО в указанный период не отмечалось (рис. 15б).

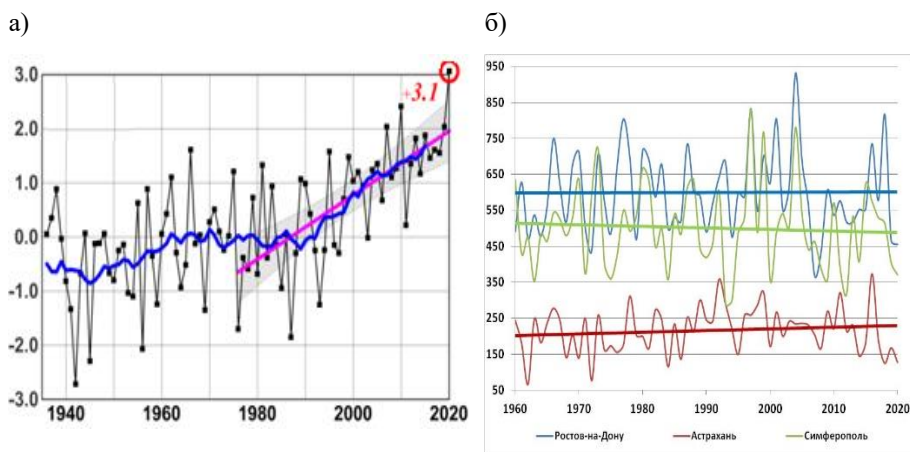
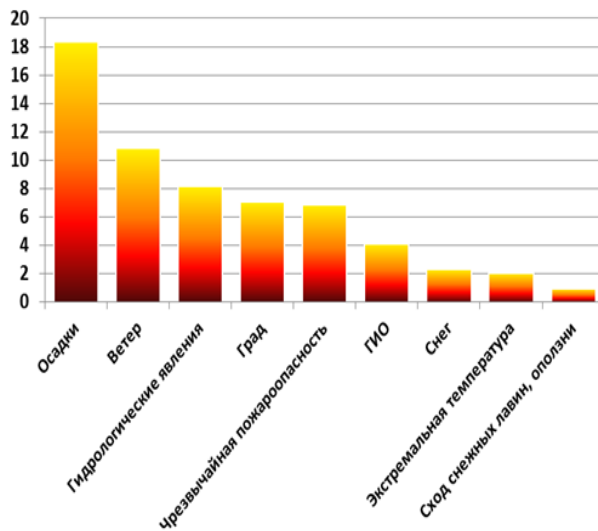


Рис. 15. Среднегодовые аномалии температуры приземного воздуха, осредненные по территории ЮФО, °С, 1936–2020 гг. (а); годовые суммы осадков, мм, 1960–2020 гг. на станциях Ростов-на-Дону, Астрахань, Симферополь (б)

В последнее 30-летие на территории ЮФО наиболее часто наносили ущерб опасные гидрометеорологические явления, связанные с высокими скоростями ветра, экстремальными осадками, наводнениями (рис. 16).

а)



б)

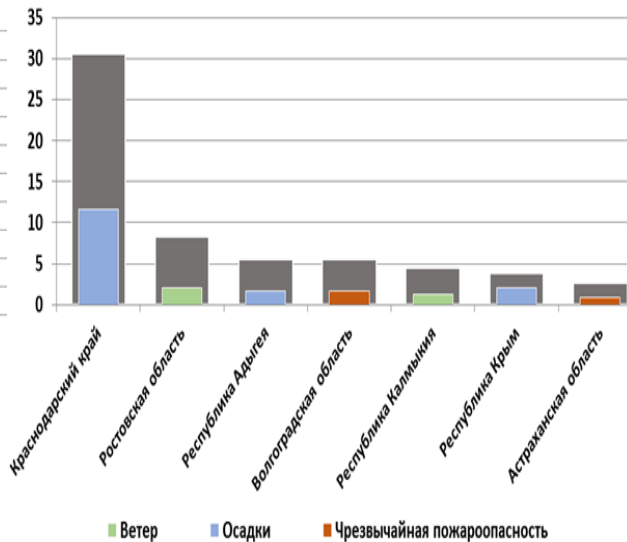


Рис. 16. Среднее годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями, нанесшими ущерб в 1991–2020 гг. на территории: а) ЮФО; б) отдельных субъектов ЮФО. Цветом выделены явления, наиболее часто наносившие ущербы (по данным ВНИИГМИ–МЦД <http://meteo.ru/data>)

1.2 Прогнозные оценки изменений температуры и осадков

Дальневосточный федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 17) возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на севере и северо-западе округа на 1–1,5 °С, а на юге и юго-востоке — на 2–3 °С (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом могут возрасти на 10–20 %, прежде всего на территории республики Саха и Чукотского автономного округа. Зимой в северной части ДФО возможен рост температуры воздуха на 5–7, в южной части — на 3–5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20–40, а на побережье Северного Ледовитого океана — 50–70 %.

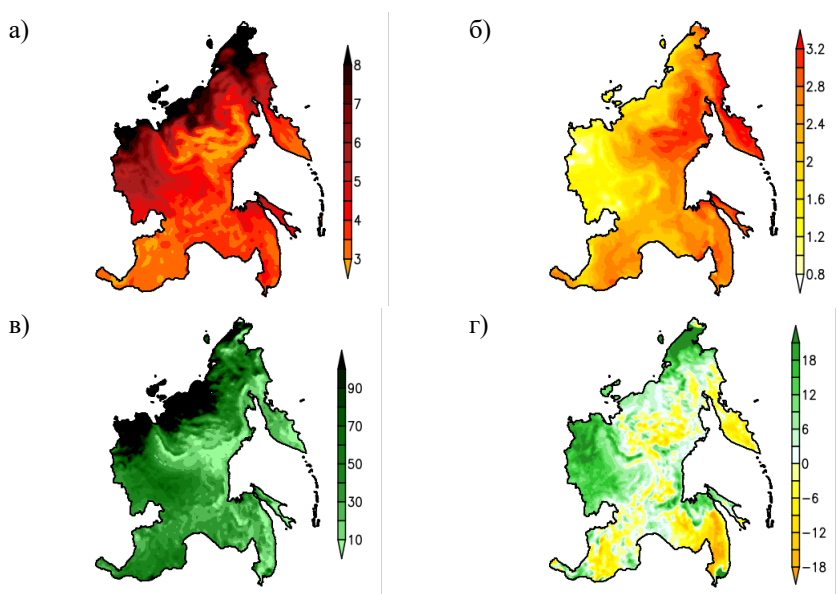


Рис. 17. ДФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг.

Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГТО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Приволжский федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 18) на всей территории ПФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2,5–3,5 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом могут уменьшиться на 5–15 %, в наибольшей степени уменьшение осадков затронет юг ПФО. Зимой возможен рост температуры воздуха на 3–5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10–30 %.

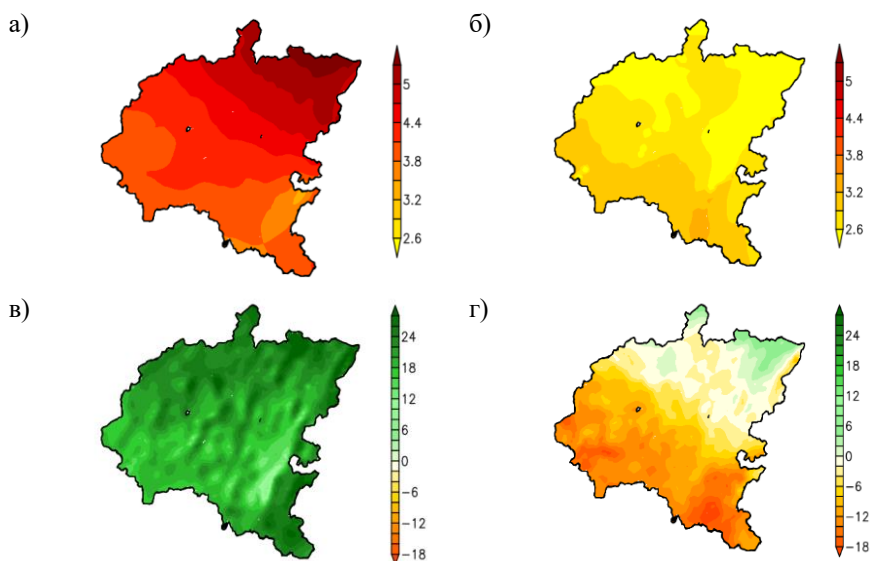


Рис. 18. ПФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Северо-Западный федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 19) на всей территории СЗФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 1–3 °С. Наибольшее потепление ожидается на побережье Северного

Ледовитого океана (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом могут возрасти на 5–15 %. Зимой в восточной части СЗФО возможен рост температуры воздуха на 5–10, в западной части — на 3–5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на востоке СЗФО может составить 40–60, на западе округа — 20–30 %.

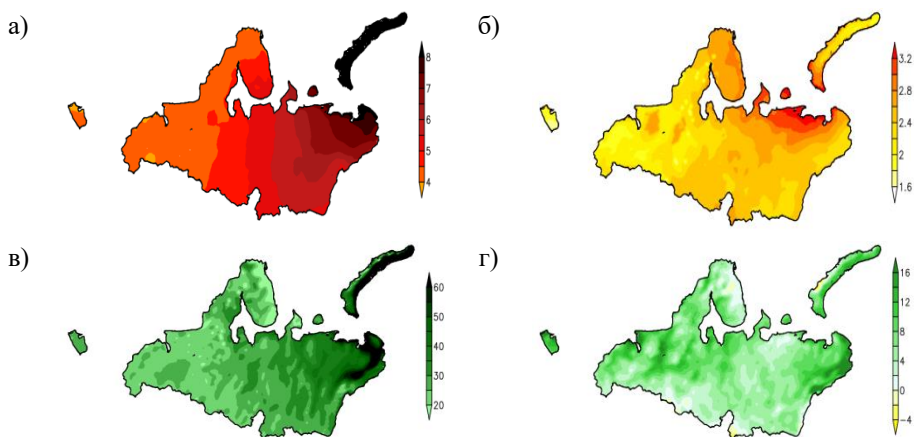


Рис. 19. СЗФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Северо-Кавказский федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 20) на всей территории СКФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2–3,5 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом в горных районах могут увеличиться на 10–30, а на равнинах уменьшиться на 4–8 %. Зимой на территории СКФО ожидается рост температуры воздуха на 1,5–3,5 °С, наиболее выраженный на севере округа. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 15–35 %, однако

на побережье Каспийского моря вероятно уменьшение зимних осадков на 3–5 %.

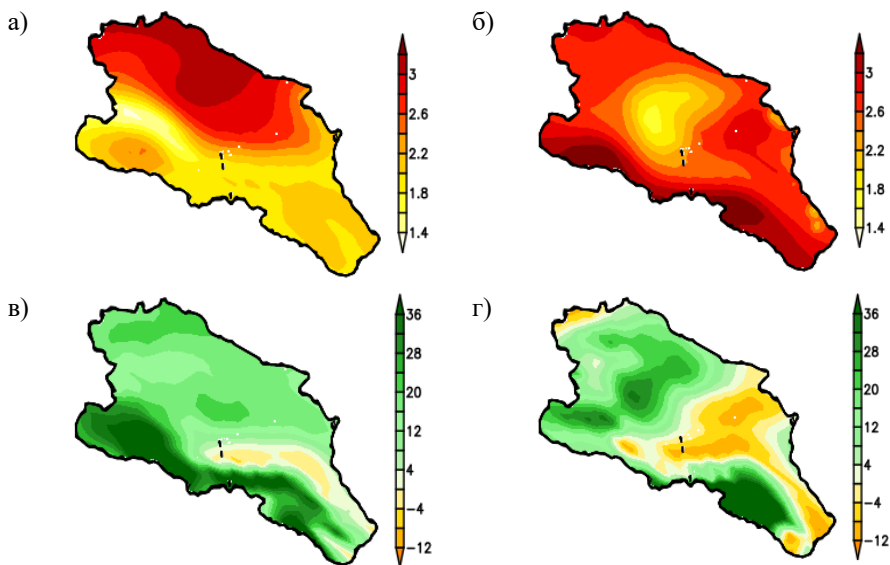


Рис. 20. СКФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Сибирский федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 21) на большей части СФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 1–1,5, а на юге — на 2–3 °С (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом на севере и в центре округа могут возрасти на 10–20, а на юге уменьшиться на 5–10 %. Зимой в северной и центральной частях СФО возможен рост температуры воздуха на 5–8, в южной части — на 3–5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20–40, а на побережье Северного Ледовитого океана — 50–80 %.

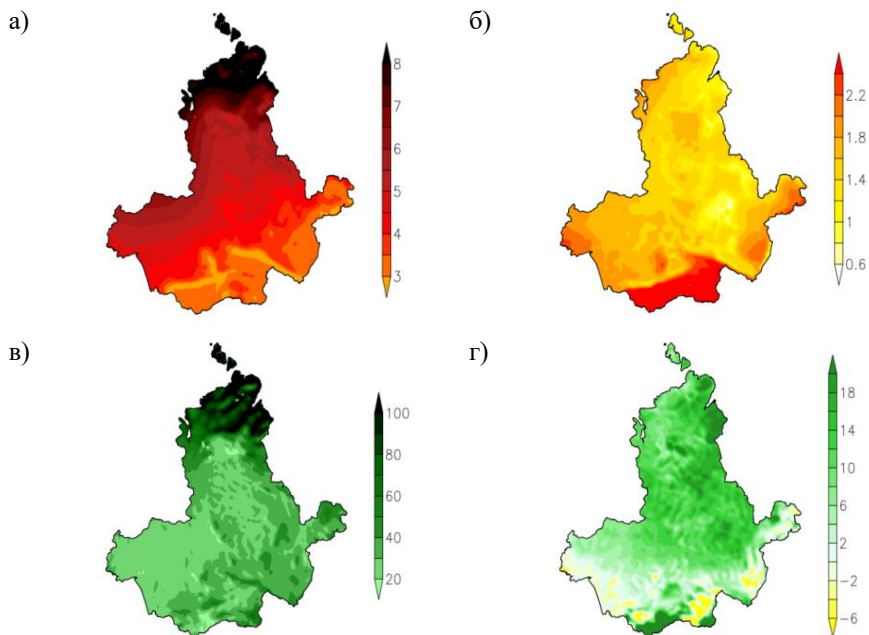


Рис. 21. СФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГТО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Уральский федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 22) в западной и юго-западной части УФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2–3, в восточной части — на 1–2 °С (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом на севере округа могут возрасти на 5–10, а на юге уменьшиться на 5–10 %. Зимой в северной и центральной частях УФО возможен рост температуры воздуха на 5–8, в южной части — на 3–5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20–40, а на побережье Северного Ледовитого океана — 50–60 %.

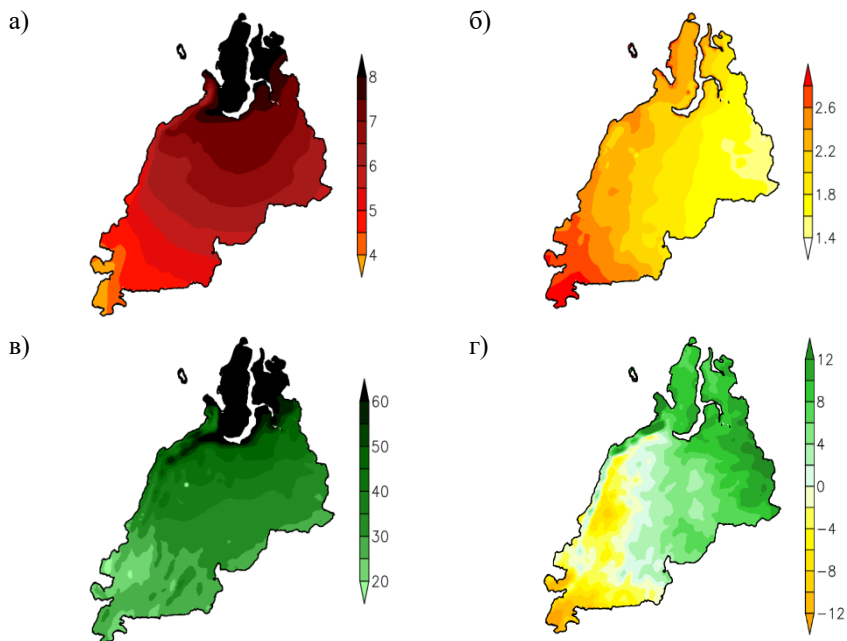


Рис. 22. УФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГТО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Центральный федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 23) на всей территории ЦФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 1,5–3 °С. Наибольшее потепление ожидается на юге округа (Shkolnik et al., 2018). Суммы осадков летом могут уменьшиться на 5–15 %, в наибольшей степени уменьшение осадков затронет центр и юг ЦФО. Зимой возможен рост температуры воздуха на 3,5–4,5 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10–20 %.

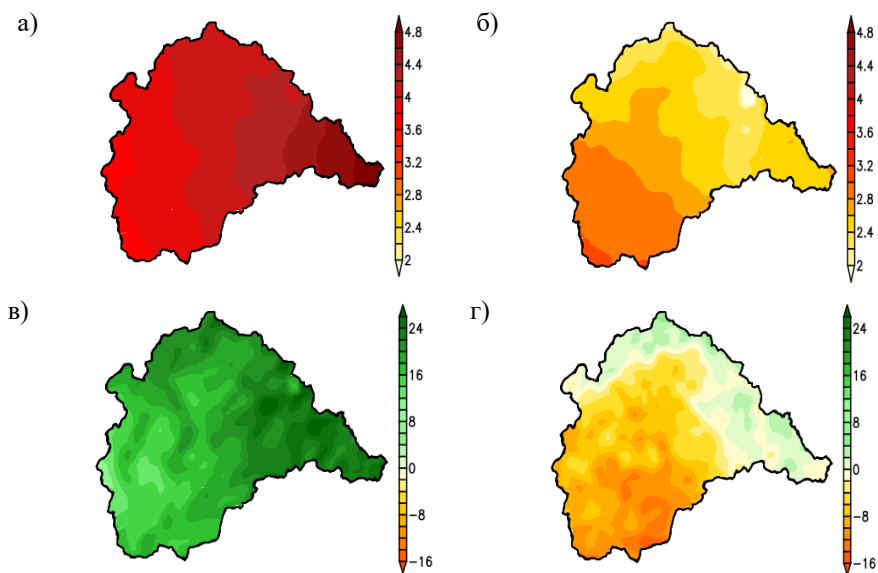


Рис. 23. ЦФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Южный федеральный округ. К середине XXI в. по отношению к концу XX в. (рис. 24) на всей территории ЮФО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2–3,5 °С (Shkolnik et al., 2018). Наибольшее потепление ожидается на востоке округа. Суммы осадков летом на большей части округа, исключая предгорья Кавказа, могут уменьшиться на 5–15 %, в горных районах вероятно увеличение сумм осадков на 15–20 %. Зимой на территории ЮФО ожидается рост температуры воздуха на 2–4 °С. Увеличение сумм осадков в зимний сезон может составить 10–30, однако в Крыму вероятно уменьшение зимних осадков на 3–5 %.

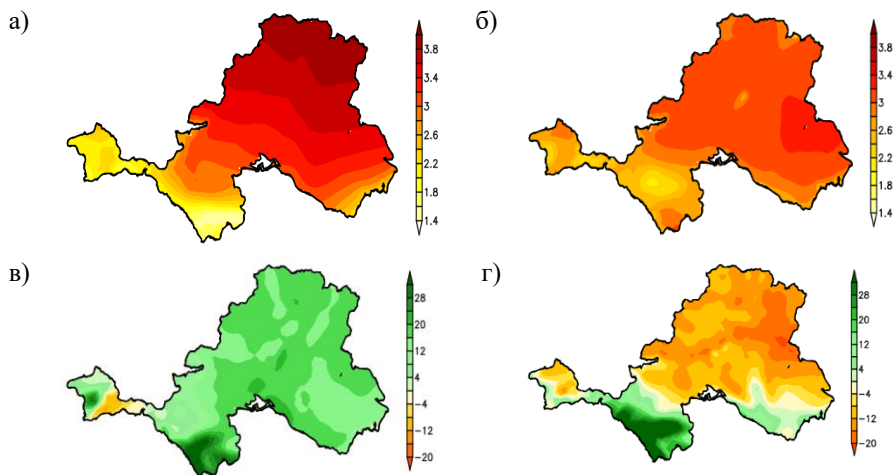


Рис. 24. ЮФО. Изменение средней температуры воздуха (а, б) и сумм атмосферных осадков (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

1.3 Водные ресурсы

Дальневосточный федеральный округ. Дальневосточный федеральный округ (площадь 6 952 555 км², население 8 124 053 чел. на 2021 г.) обладает значительными водными ресурсами, составляющими 2001 км³ в год. На территории округа расположена большая часть бассейна р. Лена, бассейны рр. Колыма, Индигирка, Яна, Оленок, российская часть бассейна р. Амур.

В многолетних колебаниях водных ресурсов, из которых 80 % формируются на территории округа, присутствует статистически значимый положительный тренд. В 1978–2020 гг. по сравнению с предшествующим периодом (1936–1977) водные ресурсы ДФО, водообеспеченность территории увеличились на 4 %. Основной вклад в современное увеличение водных ресурсов (7–11 %) вносят реки, относящиеся к бассейну Северного Ледовитого океана. При

повышенной водности существенно увеличилась вариация колебаний годового стока этих рек. В отличие от северных рек, годовой сток р. Амур в последние десятилетия снизился на 8 %. Снижение годового стока отмечается также на реках Забайкалья и крайнего северо-востока ДФО.

Приволжский федеральный округ. Основные реки ПФО — Волга, Кама, Белая, Урал — зарегулированы водохранилищами. Во внутригодовом распределении стока рек с естественным водным режимом в последние десятилетия произошли изменения, характеризующиеся, прежде всего, увеличением зимнего и летне-осеннего стока. Наиболее значительный его рост, на 100–150 и 50–100 % соответственно, наблюдается на реках южной и юго-западной части округа (Георгиевский и др., 2018). Здесь же отмечается и существенное, на 40–60 %, снижение стока в весенние месяцы. Напротив, в восточной части ПФО на реках, сток которых формируется на склонах Уральских гор, а также на севере территории весенний сток в последние десятилетия увеличился. Здесь же возрастает повторяемость опасных максимальных расходов воды весеннего половодья, что повышает риски наводнений (Георгиевский и др., 2019). Вместе с тем, на всей территории ПФО уменьшилась опасность формирования низких расходов воды редкой повторяемости в меженные периоды.

Северо-Западный федеральный округ. Средние многолетние водные ресурсы СЗФО (площадь 1 686 972 км², население 13 941 959 чел. на 2021 г.) составляют 590 км³ в год, из которых 90 % формируется в пределах рассматриваемой территории и только 10 % поступают с сопредельной территории. В среднем за период 1978–2020 гг. общие и местные водные ресурсы, удельная водообеспеченность территории и населения были на 9 % больше, чем в предшествующий многолетний период.

Удельная водообеспеченность территории округа при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 350 тыс. м³ в год, при местных — 316 тыс. м³ в год, а удельная водообеспеченность

населения равна 44,0 и 39,8 тыс. м³ в год соответственно (категория водообеспеченности очень высокая). В СЗФО нет ни одного субъекта, в котором водообеспеченность общими водными ресурсами снижалась бы до 10 тыс. м³ на человека — критерия средней водообеспеченности, однако величина водообеспеченности местными водными ресурсами ниже 5 тыс. м³ на человека отмечается в Ленинградской и Калининградской областях и оценивается как низкая. Во всех субъектах, за исключением Ленинградской и Калининградской областей, в современный период водообеспеченность увеличилась за счет увеличения стока и снижения численности населения.

Сток крупнейших рек СЗФО — Печоры и Северной Двины — в 1978–2020 гг. был больше, чем в 1936–1977 гг., на 17 и 5 % соответственно. Увеличение частоты формирования максимальных расходов воды малой обеспеченности, являющихся причиной наводнений, наблюдается в последние десятилетия на весьма ограниченном числе рек, расположенных в верхней части бассейна Северной Двины и в бассейне Ладожского озера (Георгиевский и др., 2019).

Северо-Кавказский федеральный округ. В среднем за период 1978–2020 гг. общие и местные водные ресурсы, удельная водообеспеченность СКФО были на 2 % больше, чем в предшествующий многолетний период. Удельная водообеспеченность территории СКФО при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 166 тыс., при местных – 155 тыс. м³ в год.

СКФО с общей численностью населения почти 10 млн человек и с его высокой плотностью (58,5 человек на км²) является регионом с самой низкой в России водообеспеченностью населения — около 4 тыс. м³ на человека в год (Балонишникова, 2021). Наибольший дефицит водных ресурсов отмечается в Республике Ингушетия и в Ставропольском крае. Водообеспеченность местными водными ресурсами в этих субъектах составляет 1,1 и 0,4 тыс. м³ на человека в год соответственно. В СКФО во всех субъектах отмечается тенденция снижения водообеспеченности в течение периода

1978–2020 гг. за счет увеличения численности населения при стабильности водных ресурсов.

Водные ресурсы основных рек СКФО — Терека, Сулака, Самура — интенсивно используются для обеспечения нужд населения, орошаемого земледелия, энергетики. Сток р. Сулак зарегулирован Меатлинской ГЭС, в бассейне р. Терек функционируют многочисленные гидротехнические сооружения, каналы. Река Самур является трансграничной, ее водные ресурсы используются как на территории РФ, так и Азербайджана. Сток рек Сулака и Самура снизился в последние десятилетия на 6 и 12 % соответственно, а р. Терек увеличился на 8 %.

В последние десятилетия на отдельных реках СКФО возросла повторяемость больших расходов воды при прохождении дождевых паводков (Георгиевский и др., 2019).

Сибирский федеральный округ. Основной составляющей водных ресурсов Сибирского федерального округа (площадь 4 361 727 км², население 17 003 927 чел. на 2021 г.), равных 1320 км³ в год, является сток крупнейшей реки РФ Енисея, бассейн которого практически полностью расположен в пределах рассматриваемой территории. Здесь также расположены бассейны Верхней Оби, Верхней Лены, Верхнего Иртыша, Нижнего Витима, а также ряда рек Арктического региона. Около 14 % от общих водных ресурсов округа поступает с сопредельной территории. В целом, при современных климатических условиях водные ресурсы округа, удельная водообеспеченность территории и населения были незначительно выше, чем в 1936–1977 гг. Население СФО численностью 17 млн человек и плотностью населения 3,9 чел./км² имеет очень высокую водообеспеченность, которая за период с 1980 г. повышается в большинстве субъектов. Однако в СФО водообеспеченность местными водными ресурсами в двух субъектах — Новосибирской и Омской областях — составляет 2,0 и 3,2 тыс. м³ в год на душу населения, что является очень низкой и низкой соответственно (Балонишникова, 2021).

Крупнейшими реками, протекающими по территории СФО, являются Енисей, Ангара, Витим, Лена, Обь, Иртыш. Сток рек Енисея и Витима в 1978–2020 гг. был на 7 и 21 % (соответственно) выше, чем в предшествующий период, при этом возросла его дисперсия. Сток р. Обь, наоборот, был на 14 % ниже, а его дисперсия существенно уменьшилась. Снижение годового стока произошло и на р. Ангаре (на 2 %).

На реках, расположенных в верхней части бассейнов Ангары и Иртыша, возросли риски опасных дождевых паводков (Георгиевский и др., 2019). Примером этих опасных гидрологических явлений являются наводнения на реках бассейна Верхней Ангары, произошедшие в 2019 г. (Георгиевский и др., 2020).

Уральский федеральный округ. Средние многолетние водные ресурсы УФО (площадь 1 818 497 км², население 12 329 500 чел. на 2021 г.) составляют 610 км³ в год, их многолетняя динамика характеризуется наличием положительного, статистически значимого линейного тренда. На долю водных ресурсов местного формирования приходится 65 % от общих, а на долю притока с сопредельной территории — 35 %.

Удельная водообеспеченность территории УФО при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 335 тыс. м³ в год, при местных — 217 тыс. м³ в год, а удельная водообеспеченность населения равна 51,0 и 34,5 тыс. м³/год соответственно (очень высокая водообеспеченность). В последние десятилетия произошли очень незначительные изменения удельной водообеспеченности территории и населения УФО общими и местными водными ресурсами.

Водообеспеченность населения в целом в УФО высокая. Однако проблемы водообеспеченности имеют место в Курганской и Челябинской областях с недостаточными водными ресурсами. Современная водообеспеченность общими водными ресурсами в этих субъектах характеризуется как низкая — 4,9 и 2,1 тыс. м³/чел. в год соответственно, а местными водными ресурсами — как очень низкая — 0,9 и 1,9 тыс. м³/чел. в год соответственно. Для всех

субъектов УФО характерна стабильность в величинах водообеспеченности без каких-либо значимых изменений.

Большая часть территории УФО расположена в бассейне р. Иртыш, нижнего и среднего течения р. Обь. Сток с сопредельной территории поступает по Верхней Оби, а также по Иртышу с территории Казахстана.

В современный период снизился на 10 % приток с сопредельной территории в результате уменьшения стока Верхней Оби, а местный сток увеличился на 17 %. В целом, общие водные ресурсы увеличились на 6 %.

Для южной части территории УФО, на реках бассейна Тобола, в последние десятилетия отмечается тенденция увеличения максимальных расходов воды, в том числе малой обеспеченности (Георгиевский и др., 2019).

Центральный федеральный округ. Средние многолетние ресурсы поверхностных вод Центрального федерального округа (площадь 650 205 км², население 39 250 960 чел. на 2021 г.) составляют 129 км³ в год, из которых 81 % формируется в пределах рассматриваемой территории.

В период современного потепления (1978–2020) общие водные ресурсы были на 11 %, а местные — на 9 % больше, чем в предшествующий многолетний период (1936–1977).

Согласно классификации (Водные ресурсы России..., 2008), удельная водообеспеченность ЦФО местными и общими водными ресурсами является низкой. Сравнивая два периода, необходимо отметить, что водообеспеченность общими водными ресурсами в большинстве субъектов не меняется, за исключением г. Москвы и Московской области, где она снижается. Водообеспеченность местными водными ресурсами за второй период снижается в Белгородской, Брянской, Владимирской, Воронежской, Тамбовской и Тульской областях.

Сток большинства рек рассматриваемой территории в зимний и летне-осенний периоды увеличился на 50–100 и 25–50 % соответственно, а сток в период весеннего сезона снизился на 20–40 %

(Георгиевский и др., 2018). В результате существенно уменьшились риски опасных гидрологических явлений, связанных как с формированием очень высоких расходов воды в период весеннего половодья, так и низких расходов в меженные периоды. Только в северо-восточной части ЦФО в последние десятилетия отмечается увеличение повторяемости высоких расходов воды в период весеннего половодья (Георгиевский и др., 2018).

Южный федеральный округ. Средние многолетние водные ресурсы ЮФО (площадь 447 821 км², население 16 482 488 чел. на 2021 г.) оцениваются в 301 км³ в год, при этом 90 % этого объема поступает с сопредельной территории в результате транзитного стока рек Волги и Дона. Большую часть местных водных ресурсов составляют ресурсы р. Кубань. В среднем, за 1978–2020 гг. водные ресурсы ЮФО были на 11 % выше, чем за предшествующий многолетний период (1936–1977). Удельная водообеспеченность территории округа при средних многолетних общих водных ресурсах составляет 673 тыс., при местных — 65 тыс. м³ в год, а удельная водообеспеченность населения равна 19,2 тыс. и 1,91 тыс. м³ в год соответственно (очень низкая). Водообеспеченность местными водными ресурсами является низкой в Краснодарском крае и катастрофически низкой в Астраханской, Волгоградской, Ростовской областях и в Республике Крым — ниже 1 тыс. м³/чел. в год (Балонишникова, 2021).

В последние десятилетия произошло увеличение удельной водообеспеченности на 7 % общими водными ресурсами, а водообеспеченность местными водными ресурсами осталась практически неизменной.

В горной и предгорной частях территории ЮФО в условиях происходящих изменений климата возросла опасность наводнений в результате дождевых паводков, в том числе быстроразвивающихся (Георгиевский и др., 2019). Катастрофические, ранее не наблюдаемые паводки с большими материальными потерями и человеческими жертвами произошли в 2004 г. на реках Кубань, Лаба, Белая, а в 2012 г. — на р. Адагум.

2 Экономика федеральных округов в меняющемся климате

2.1 Добывающая промышленность

Дальневосточный федеральный округ. Влияние климатических изменений на процессы и объекты добывающей промышленности ДФО очень неоднородно на фоне разнообразия геологических, физико-географических и климатических условий региона. Одним из определяющих факторов является увеличение средней годовой температуры воздуха практически на всей территории округа за счет роста температуры в холодный и теплый периоды года. Этот процесс имеет как отрицательные, так и положительные последствия для добычи полезных ископаемых. Повышение температуры воздуха, наблюдаемое на территории ДФО, способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако в районах распространения многолетнемерзлых пород потепление климата приводит к уменьшению несущей способности мерзлого грунта. В области наибольшего геокриологического риска находятся Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии (Калабина, Зворыкина, 2019). В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме до Певека на побережье Восточносибирского моря, снабжающие электроэнергией многие горнодобывающие предприятия.

Негативным фактором, связанным с изменением климата, является и рост повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений, в частности, усиление пожароопасности на фоне длительных волн жары и засушливых периодов. Это явление особенно ярко проявилось летом 2021 г. в республике Саха и Иркутской области, что привело к огромным материальным потерям. Пожароопасные ситуации создают значительные риски для объектов добывающей промышленности, прежде всего, добычи нефти, газа, бурого и каменного угля.

В то же время в последние десятилетия на территории многих субъектов ДФО (республика Саха, Амурская область и др.)

отмечаются экстремальные суточные суммы осадков в отдельные годы. Следствием более интенсивных осадков может стать усиление оползней и обвалов в карьерах и шахтах, их затопление из-за сбоев в работе систем водоотведения, нарушение гидрологического режима хвостохранилищ.

Согласно прогнозным оценкам, указанные тенденции изменения температурно-влажностного режима к середине XXI в. на территории ДФО сохранятся (Shkolnik et al., 2018) (рис. 17 б, г, 25 б, в, г). Увеличение суточных максимумов осадков в республике Саха, Иркутской и Амурской областях могут составить 20–50 % по отношению к периоду 1990–1999 гг. При этом возрастут риски и экстремально высоких температур воздуха (Хлебникова и др., 2019а) (рис. 26д).

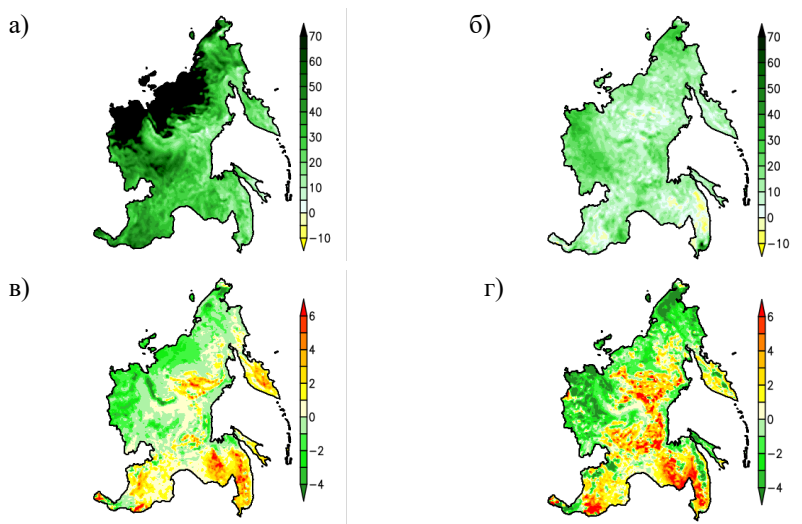


Рис. 25. ДФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сут. для теплого сезона, дни; г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сут. для теплого сезона, дни

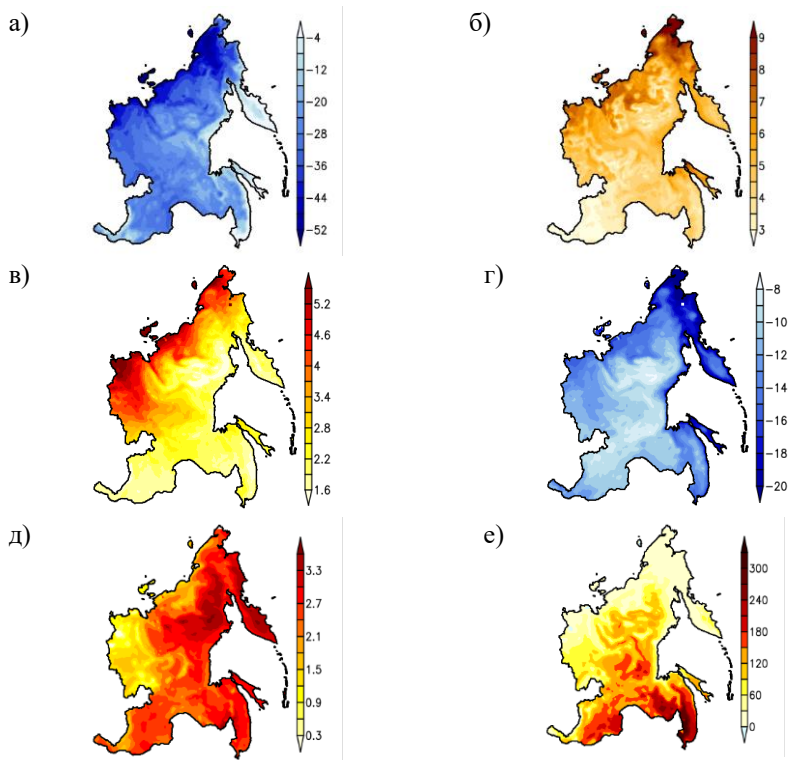


Рис. 26. ДФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999:

- а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже -30°C , дни; б) температура наиболее холодной пятидневки, $^{\circ}\text{C}$;
- в) средняя температура отопительного периода, $^{\circ}\text{C}$; г) градусо-сутки отопительного периода, %;
- д) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$; е) дефицит холода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО».

Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Для адаптации объектов добывающей промышленности к изменяющемуся климату целесообразно разрабатывать климатический прогноз на уровне конкретного объекта, что позволит уменьшить погодно-климатические риски данного объекта

и прилегающих к нему районов. Для улучшения качества используемой климатической информации необходимо расширять сеть гидрометеорологических наблюдений. Осуществление работ по геотехническому мониторингу криолитозоны в комплексе с анализом метеорологических данных позволит охарактеризовать современные изменения температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых грунтов на территории ДФО и определить условия и факторы, влияющие на формирование температурного режима грунтов.

Приволжский федеральный округ. Минерально-сырьевая база ПФО играет ключевую роль в экономике региона. На территории округа добывается более 20 % российской нефти. Ведется добыча природного газа в Оренбургской области, калийных солей, фосфоритов, цинка, меди, серебра, золота в предгорьях Урала.

Наибольшее влияние на добывающую промышленность ПФО оказывает увеличение температуры воздуха и некоторое уменьшение осадков в теплый период года, особенно на юге ПФО. Эти факторы приводят к росту пожароопасности в этом районе, что обуславливает значительные риски для добычи нефти и газа. Более теплая погода провоцирует и риски уменьшения добычи газа, так как рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива.

Наблюдаемая тенденция увеличения месячных и суточных сумм осадков на северо-востоке ПФО, в предгорьях Урала может создавать угрозу для добычи полезных ископаемых в шахтах и карьерах, вызывая оползни, осыпи, обрушения по бортам действующих и отработанных карьеров, а также провоцируя риски затопления шахт.

По данным климатического моделирования к середине XXI в. ожидается усиление наблюдаемых тенденций изменения температурно-влажностного режима на территории ПФО (рис. 18б, г, 27г, 28б, г).

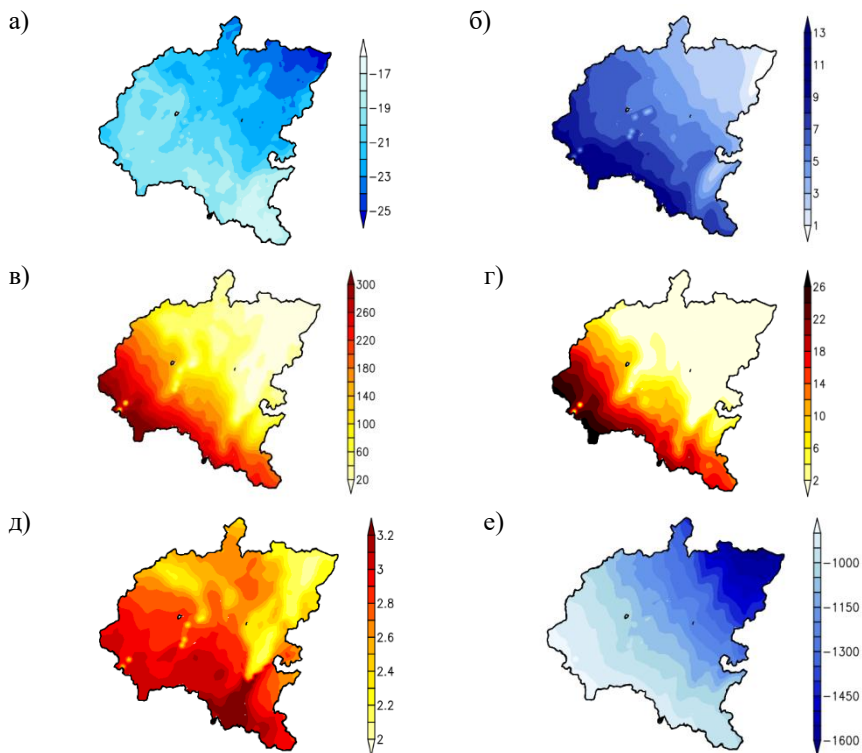


Рис. 27. ПФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха, дни; б) число дней с переходом температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; в) дефицит холода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$; г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; д) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$; е) градусо-сутки отопительного периода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$ Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

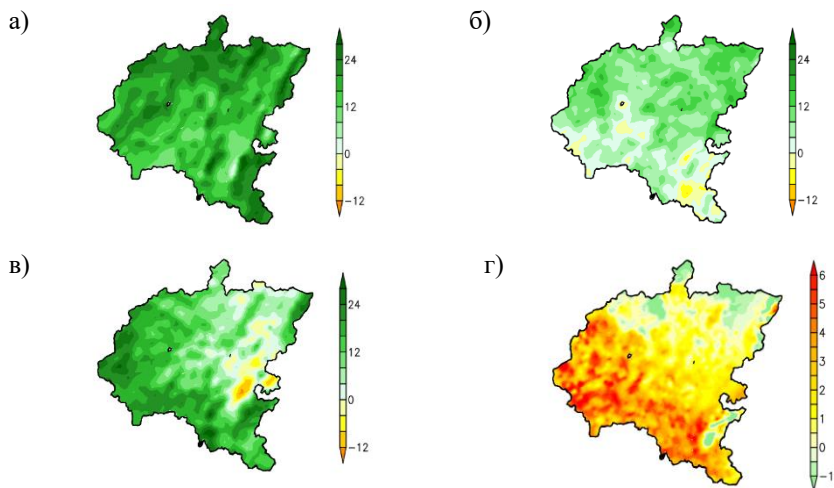


Рис. 28. ПФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная сумма осадков непрерывного периода с осадками больше 1 мм/сут. для холодного сезона, %; г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сут. для теплого сезона, дни. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Для адаптации добывающей промышленности ПФО к изменяющемуся климату необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

Северо-Западный федеральный округ. Территория СЗФО богата полезными ископаемыми. К наиболее важным отраслям добывающей промышленности округа относится добыча нефти и газа (месторождения в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и на шельфе Баренцева моря), угля (Печерский бассейн), железной

руды и руд цветных металлов (Мурманская область, республика Карелия, Ленинградская область).

В условиях изменения климата сложные производственные процессы нефте- и газодобычи, включающие геологоразведку, бурение и строительство скважин, их ремонт, очистку добытой нефти от примесей, становятся особенно уязвимыми как для опасных гидрометеорологических явлений (экстремальные ветровые и гололедные нагрузки, сильные дожди, повышенная пожароопасность и т. д.), так и для последствий медленных климатических изменений (рост уровня моря, разрушение морских побережий и прибрежной инфраструктуры, деградация многолетнемерзлых пород). Сложности при разработке месторождений на шельфе связаны с низкими температурами воздуха, ледовыми условиями, необходимостью соблюдения более жестких экологических требований (Калабина, Зворыкина, 2019).

Изменение климата в Арктике имеет как отрицательные, так и положительные последствия для добычи полезных ископаемых. Наблюдаемое и ожидаемое в будущем повышение температуры воздуха на территории СЗФО способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако связанное с потеплением таяние льдов может привести к росту айсберговой и штормовой активности в Арктическом бассейне. Это затруднит добычу полезных ископаемых на шельфе, а также будет способствовать дальнейшей абразии морских побережий. Кроме того, рост температуры воздуха и уменьшение числа дней с отрицательными температурами обуславливает увеличение пожароопасности в этом регионе, что создает дополнительные риски для нефте- и газодобычи. Следствием изменения температурно-влажностного режима, особенно выраженного в северной части округа, является и усиление коррозионной агрессивности атмосферы, сокращающей эксплуатационный ресурс нефтегазового оборудования.

Важным фактором, влияющим на добычу газа, является повторяемость температуры воздуха выше 15 °С, при которой происходит уменьшение добычи топлива из-за падения мощности компрессорных станций. В районе Вуктыльского газового

месторождения, дающего 90 % газа СЗФО, продолжительность периода с такой температурой в последнее десятилетие увеличилось примерно на 10 дней по сравнению с 1961–1990 гг.

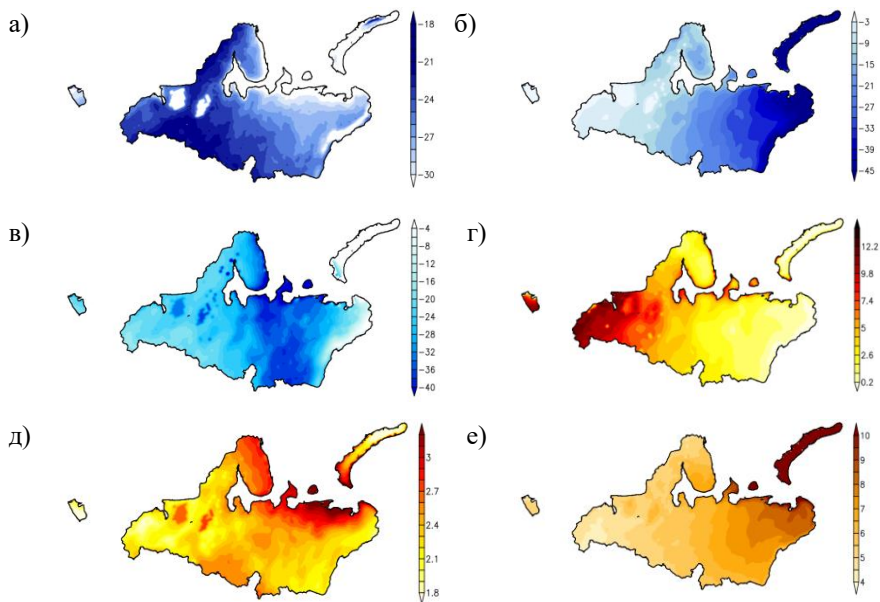


Рис. 29. СЗФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха, дни; б) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; в) продолжительность отопительного периода, дни; г) число дней с переходом температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; д) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$; е) температура наиболее холодной пятидневки, $^{\circ}\text{C}$. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

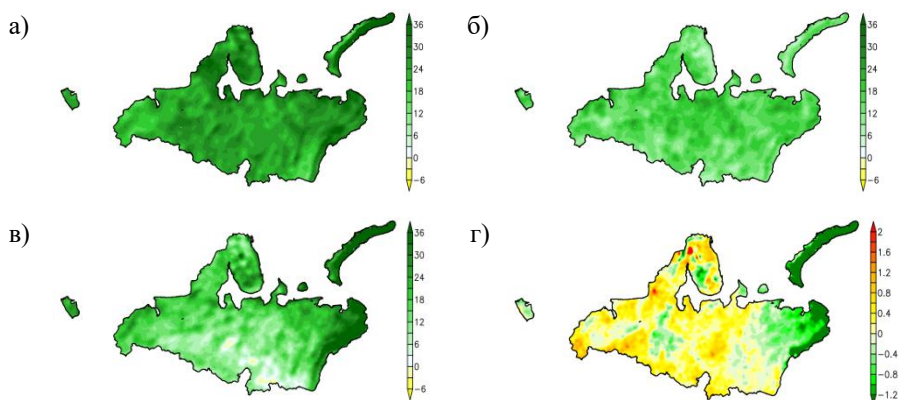


Рис. 30. СЗФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999:

- а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная сумма осадков непрерывного периода с осадками больше 1 мм/сут. для холодного сезона, %; г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сут. для теплого сезона, дни. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Влияние изменения климата на добычу угля в целом носит также негативный характер. Добыча угля в Печорском бассейне (Воркута, Инта) ведется подземным способом в условиях многолетней мерзлоты. Деградация многолетнемерзлых пород в этом районе создает дополнительные риски аварий на шахтах в результате обрушения горных пород. Погодно-климатические риски при открытом способе добычи полезных ископаемых (например, железной руды в Мурманской области и Карелии, бокситов в Ленинградской области, бокситов и каменного угля в республике Коми) обусловлены возможным усилением оползневых процессов в карьерах из-за возрастания количества осадков и повторяемости значительных (более 1 мм) суточных сумм осадков, а также удлинения периода формирования оползней в связи с увеличением числа дней с положительной температурой воздуха и почвы. Изменение температурно-влажностного режима создает и дополнительные

экологические риски для функционирования хвостохранилищ. Прогнозные оценки (Катцов и др., 2022) показывают, что к середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (рис. 19б, г, 29а, 30б, г).

В этих условиях для обеспечения эффективной и безопасной работы горнодобывающих предприятий необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

Северо-Кавказский федеральный округ. Добывающая промышленность СКФО представлена предприятиями по добыче природного газа и газового конденсата в Ставропольском крае, республике Дагестан и Чеченской республике. Добыча меди, золота, серебра и металлов платиновой группы ведется в Карачаево-Черкесской республике.

Наблюдаемый рост температуры воздуха как в теплый (рис. 31а), так и в холодный период года создает риски уменьшения добычи газа, так как более теплая погода приводит к падению мощности компрессорных станций.

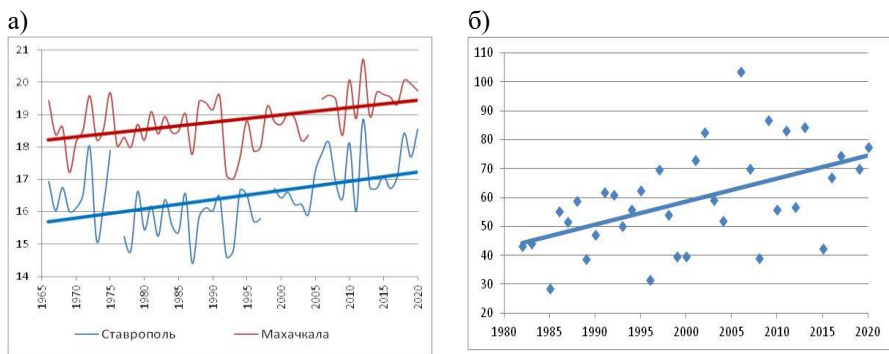


Рис. 31. Изменение температурно-влажностного режима в СКФО: а) средняя температура воздуха в теплый период года (апрель–октябрь), °С, Ставрополь, Махачкала; б) суточный максимум осадков, мм, Владикавказ

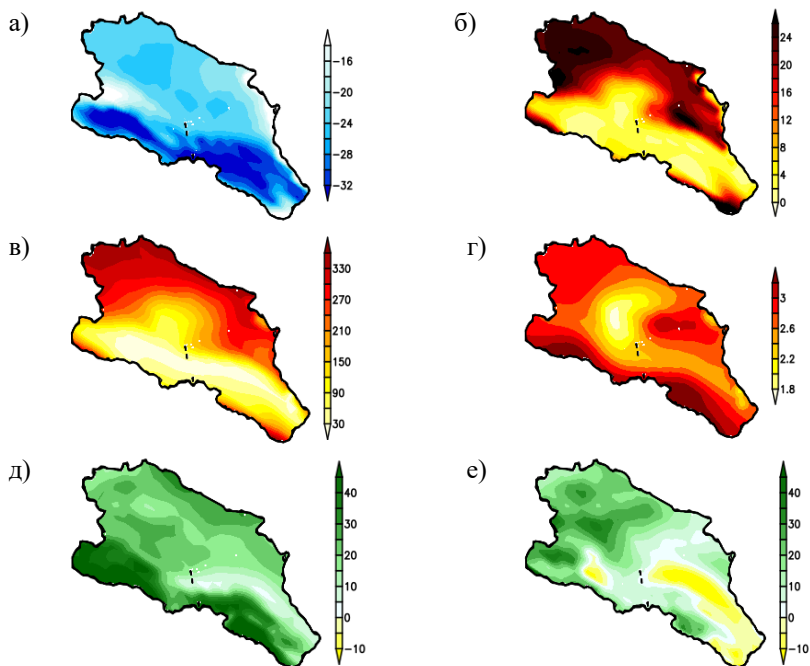


Рис. 32. СКФО. Изменение специализированных климатических показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха, дни; б) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С, дни; в) дефицит холода, °С·сут.; г) температура наиболее жаркой 30-дневки, °С; д) суточный максимум осадков холодного сезона, %; е) суточный максимум осадков теплого сезона, %. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Повышение интенсивности осадков в Северо-Кавказском регионе (рис. 31б) представляет значительную опасность для работы шахт, так как шахтные дренажные системы были спроектированы на основании значений климатических данных 2-й половины XX в. и не учитывают особенности современного климата. Интенсивные осадки могут также

усилить эрозионные процессы, ведущие к обрушению склонов карьеров.

По данным климатического моделирования ожидается интенсификация наблюдаемых изменений температурно-влажностного режима (рис. 20б, г, 32е).

Для обеспечения надежной и эффективной работы объектов добывающей промышленности СКФО необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

Сибирский федеральный округ. СФО обладает крупным ресурсным потенциалом, прежде всего твердых полезных ископаемых. Здесь сосредоточены основные запасы твердого топлива (угля, урана), металлических полезных ископаемых, нерудного сырья.

Изменение климата в этом регионе выражается в росте температуры воздуха практически на всей территории округа (рис. 33), увеличении мощности сезонно-талого слоя многолетней мерзлоты, более частых и интенсивных экстремальных погодных явлениях. Все эти проявления изменения климатических условий оказывают существенное влияние на промышленные объекты и технологические процессы добывающей промышленности. Особенно негативное воздействие на инфраструктурные объекты оказывает деградация многолетнемерзлых пород, создающая риски для транспортной инфраструктуры, гидротехнических сооружений, включая хвостохранилища, а также для функционирования шахт и карьеров.

Изменение режима увлажнения, в частности, наблюдаемый в отдельных районах округа рост суточного максимума осадков, создает угрозы затопления шахт и обрушения склонов карьеров. Однако с ростом температуры воздуха растет и испарение, создавая в засушливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов, что особенно характерно для Кемеровской области.

К середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций климатических изменений (Shkolnik et al., 2018; Хлебникова и др., 2019б; Катцов и др., 2022) (рис. 21 б, г, 34 б, в, г).

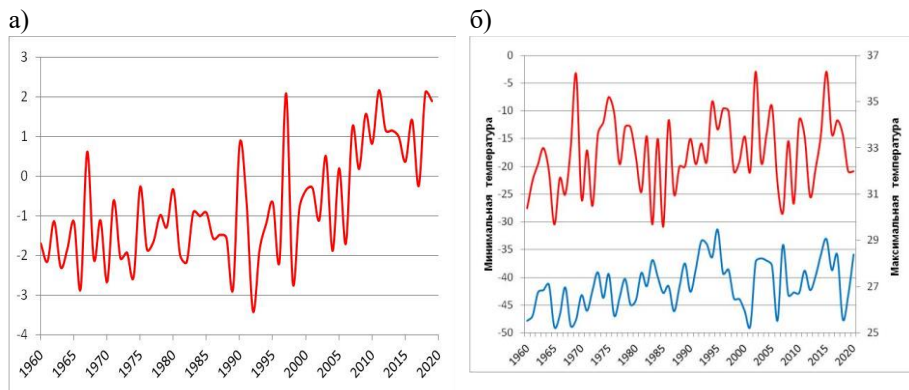


Рис. 33. Изменение температурного режима, °С, на территории СФО:
а) средняя температура воздуха в теплый период года (апрель–октябрь),
Хатанга (Красноярский край); б) минимальная и максимальная
температура воздуха, Тайшет (Иркутская обл.)

В этих условиях для обеспечения надежной и эффективной работы объектов добывающей промышленности целесообразно разрабатывать климатический прогноз для конкретного объекта (что позволит сформулировать стратегию его адаптации) и прилегающих к нему районов. Для улучшения качества используемой климатической информации необходимо расширять сеть гидрометеорологических наблюдений, включая наблюдения за температурой почвы, глубиной ее промерзания и интенсивностью осадков. Должен быть также разработан системный подход к управлению безопасностью объектов добывающей промышленности в течение всего их жизненного цикла «планирование — строительство — эксплуатация — закрытие — рекультивация» с учетом изменения климата.

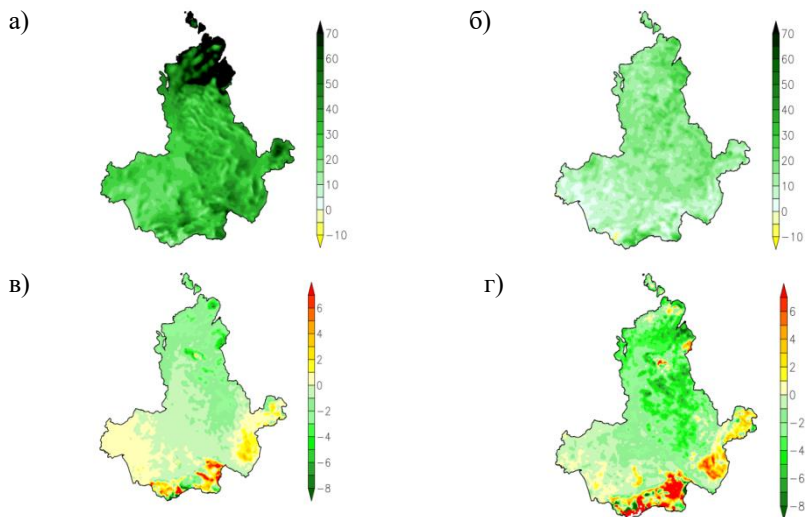


Рис. 34. СФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сут. для теплого сезона, дни; г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сут. для теплого сезона, дни. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Уральский федеральный округ. Уральский федеральный округ является крупнейшей минерально-сырьевой базой страны, как в отношении твердых полезных ископаемых (Уральская часть УФО), так и в отношении углеводородного сырья (Западносибирская часть УФО). В Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах разведаны и эксплуатируются нефтяные и газовые месторождения, относящиеся к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в которой сосредоточено 66,7 % запасов нефти (6 % мировых) и 77,8 % газа (26 % мировых запасов). На территории УФО добываются также уголь, уран, черные и цветные металлы, благородные металлы, нерудное сырье.

Наблюдаемое и ожидаемое в будущем повышение температуры воздуха способствует улучшению условий для работ на открытом воздухе и снижению затрат на отопление. Однако рост температуры воздуха и уменьшение числа дней с отрицательными температурами обуславливает увеличение пожароопасности в этом регионе, а также сокращение периода использования «зимников» и ледовых морских и речных причалов, что создает дополнительные риски для нефте- и газодобычи. Важным негативным фактором для функционирования транспортной инфраструктуры и добычи углеводородов является деградация многолетнемерзлых пород, нарушающая целостность инфраструктурных объектов. Изменение температурно-влажностного режима усиливает и коррозионную агрессивность атмосферы, сокращая эксплуатационный ресурс нефтегазового оборудования. Кроме того, более теплая погода провоцирует риски уменьшения добычи газа, так как рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива.

Изменение климата приводит к росту уровня моря (МГЭИК, 2014а). В настоящее время береговая линия п-ва Ямал перемещается в сторону суши со скоростью 4–6 мм/год (Калабина, Зворыкина, 2019). Повышающийся уровень моря создает риски более высоких штормовых нагонов, частых наводнений и более интенсивного волнового воздействия на берега. Карский регион, исходя из теории гляциоизостатических движений земной коры, подвергается риску особенно быстрого повышения уровня моря (Баранская и др., 2018).

Добыча железной руды и руд цветных металлов на территории округа ведется как открытым, так и шахтным способом. Шахтная выработка месторождений преобладает в основном в Челябинской и Свердловской областях. Комплекс гравитационных процессов (оползни, осыпи, обрушения) на этих территориях в естественных условиях развит по бортам речных долин, на горных склонах, а в техногенных — по бортам действующих и отработанных карьеров. В условиях климатических изменений, в частности увеличения количества и интенсивности осадков (рис. 35), происходит интенсификация этих процессов, провоцирующая риски затопления

шахт и подтопления ранее осушенных и благоприятных для хозяйственной деятельности территорий.

К середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (Катцов и др., 2022) (рис. 22а, б, г, 36б, в, г).

В этих условиях для обеспечения эффективной и безопасной работы горнодобывающих предприятий необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

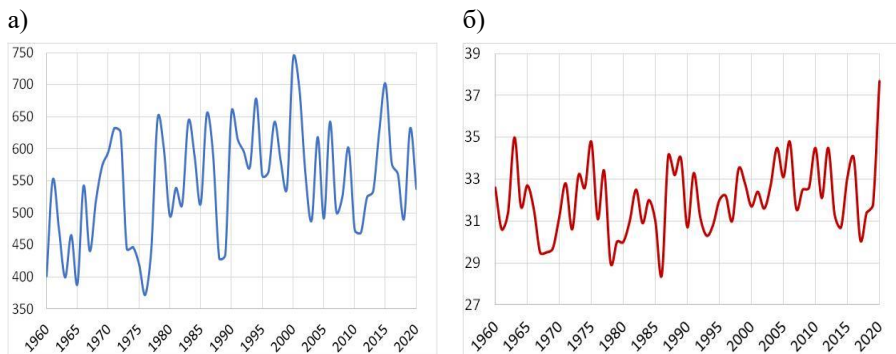


Рис. 35. Изменение режима увлажнения, мм, на территории Свердловской области (метеостанция Верхотурье): а) годовое количество осадков; б) суточный максимум осадков

Для защиты подтапливаемых территорий необходимо строительство дренажных сооружений, прочистка открытых водотоков и других элементов естественного дренирования, предупреждение утечек из водонесущих коммуникаций, регулирование стока поверхностных вод, возобновление шахтного и карьерного водоотлива для поддержания уровня подземных вод на проектных отметках.

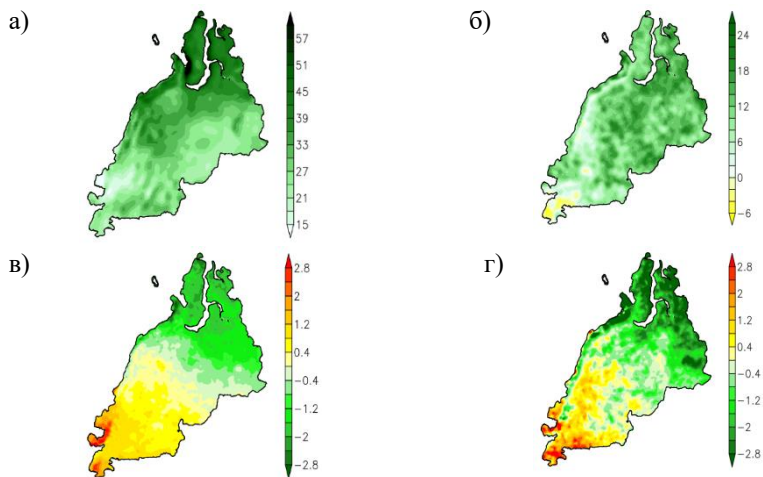


Рис. 36. УФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999:

- а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 1 мм/сут. для теплого сезона, дни; г) максимальная продолжительность непрерывного периода с осадками меньше 5 мм/сут. для теплого сезона, дни.

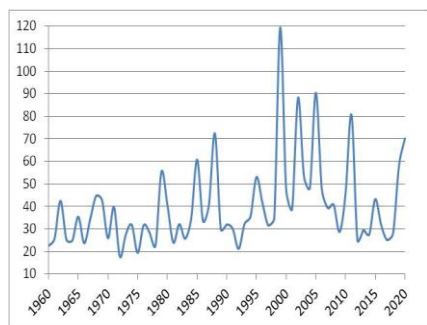
Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Центральный федеральный округ. ЦФО обладает развитой минерально-сырьевой базой. На территории округа находится 584 месторождения, представленных 26 видами полезных ископаемых (Справка..., 2021). Наиболее существенную роль в общероссийском сырьевом балансе играют запасы железных руд, которые составляют около 2/3 разведанных запасов железных руд России. Курская магнитная аномалия (КМА) располагается в юго-западной части округа на площади около 160 тыс. км². Добыча бурого угля локализована в Подмосковном угольном бассейне (Тверская, Смоленская, Московская, Калужская, Тульская и Рязанская области). В северной и центральной части округа имеются также значительные запасы торфа, и производится его добыча.

Как показывают результаты многочисленных исследований (например, SREX, 2012; МГЭИК, 2014б), территория, затронутая интенсивным антропогенным воздействием, более уязвима к изменениям климата. Техногенные грунты характеризуются низкой несущей способностью, легко размываются дождями и тальми водами, а при высыхании разрушаются под действием ветровой эрозии. Поэтому климатические изменения в ЦФО, выражающиеся в изменении как температурного режима (рост средней температуры воздуха в холодный и теплый периоды года, увеличение суточных максимумов температуры воздуха, возрастание пожароопасности), так и режима увлажнения (увеличение суточного максимума осадков, повторяемости периодов без осадков), создают значительные риски для объектов добывающей промышленности (особенно склонов карьеров, дренажных систем карьеров и шахт).

Во многих субъектах ЦФО отмечаются тенденции к увеличению интенсивности осадков, в частности к возрастанию суточного количества жидких осадков. При этом одновременно растет число дней без осадков в теплый период года (рис. 37).

а)



б)

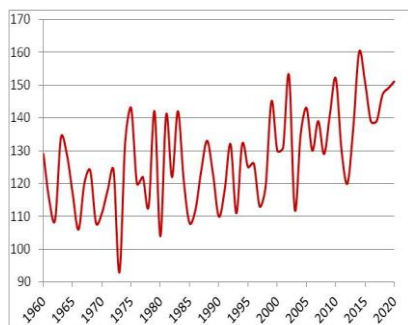


Рис. 37. Брянск: а) суточный максимум осадков, мм;
б) количество дней без осадков в теплый период года
(апрель–октябрь)

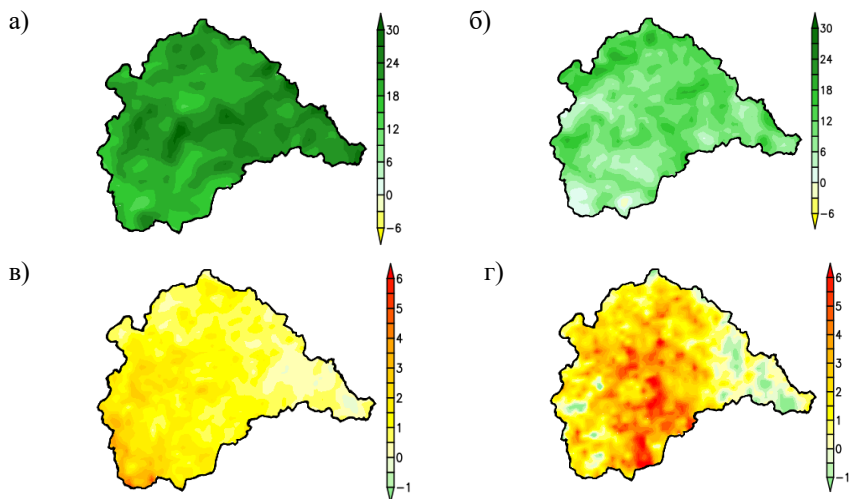


Рис. 38. ЦФО. Изменение специализированных показателей режима увлажнения в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999:

- а) суточный максимум осадков холодного сезона, %; б) суточный максимум осадков теплого сезона, %; в) максимальная продолжительность, дни, непрерывного периода с осадками менее 1 мм/сут. (теплый сезон); г) максимальная продолжительность, дни, непрерывного периода с осадками менее 5 мм/сут. (теплый сезон).

Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Следствием более интенсивных осадков может стать усиление оползней и обвалов в карьерах и шахтах, их затопление из-за сбоя в работе систем водоотведения, нарушение гидрологического режима хвостохранилищ. С другой стороны, более частые засушливые периоды способствуют высыханию и пылению терриконов и хвостохранилищ. Увеличение числа дней без осадков в сочетании с ростом температуры в теплый период года приводит к возрастанию пожароопасности, что обуславливает значительные риски для торфоразработок и прилегающих к ним территорий и населенных пунктов. Увеличение числа суток с II–V классом пожарной опасности по комплексному показателю Нестерова к концу века может составить

в среднем по округу от 6 до 11 суток (Торжков и др., 2019). Прогнозные оценки (Катцов и др., 2022) показывают, что к середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (рис. 23б, г, 38б, в, г).

Для адаптации добывающей промышленности ЦФО к климатическим изменениям необходим подробный анализ процессов экзогенного морфогенеза для определения величины погоднo-климатических рисков и решения проблем рационального природопользования. Разработки месторождения торфа должны сочетаться с мероприятиями по рекультивации торфоразработок и пожарной безопасности.

Южный федеральный округ. Основные топливно-энергетические и минерально-сырьевые ресурсы ЮФО включают месторождения природного газа и нефти в Прикаспийском регионе, угля — в Ростовской области, поваренной соли — в Астраханской области.

Наблюдаемые тенденции увеличения температуры воздуха (как в теплый, так и в холодный периоды года) и некоторого уменьшения количества осадков наиболее выражены на территории Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей. Эти процессы способствуют росту пожароопасности, что обуславливает значительные риски для добычи нефти, газа и угля. Более теплая погода может вызывать уменьшение добычи природного газа, так как рост повторяемости температуры воздуха выше 15 °С приводит к падению мощности компрессорных станций. С ростом температуры воздуха возрастает испарение, создавая в засушливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов, что может негативно повлиять на экологическую ситуацию в районах угледобычи в Ростовской области.

Интенсивные осадки, выпадающие за короткие интервалы времени, представляют значительную опасность для работы шахт и могут приводить к катастрофическим последствиям, так как шахтные дренажные системы были спроектированы на основании значений климатических данных 2-й половины XX в. и не учитывают особенности современного климата.

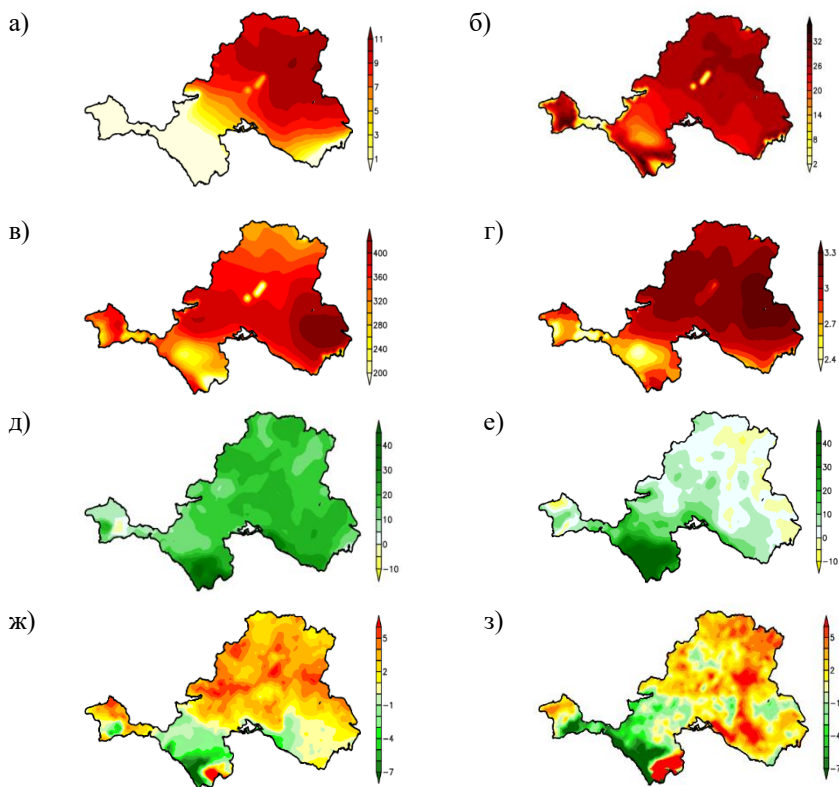


Рис. 39. ЮФО. Изменение специализированных климатических показателей в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999:

- а) число дней с переходом температуры воздуха через 0°C , дни; б) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше $+30^{\circ}\text{C}$, дни;
- в) дефицит холода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$; г) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$;
- д) суточный максимум осадков холодного сезона, %; е) суточный максимум осадков теплого сезона, %; ж) максимальная продолжительность, дни, непрерывного периода с осадками менее 1 мм/сут. (теплый сезон);
- з) максимальная продолжительность, дни, непрерывного периода с осадками менее 5 мм/сут. (теплый сезон).

Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Изменение температурно-влажностного режима в Астраханской и Волгоградской областях способствует нарушению водно-солевого баланса озер Эльтон и Баскунчак, где добывается до 90 % поваренной соли в России. В перспективе такие процессы могут дестабилизировать добычу соли в этом регионе. К середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (Катцов и др., 2022) (рис. 24 б, г, 39е).

Для адаптации добывающей промышленности ЮФО к изменяющемуся климату необходимо учитывать детальную климатическую информацию о современном и будущем климате при принятии решений как в период эксплуатации объектов по добыче полезных ископаемых, так и в период после вывода их из эксплуатации и рекультивации.

2.2 Транспорт

Дальневосточный федеральный округ. По сравнению с другими территориями Российской Федерации транспортная инфраструктура ДФО развита слабо: плотность железных дорог в 3,6, а автомобильных дорог с твердым покрытием в 5,6 раза ниже, чем в среднем по России. Примерно 1400 населенных пунктов не имеют круглогодичной связи с опорной сетью автодорог. Нормативное транспортно-эксплуатационное состояние федеральных и региональных трасс не обеспечивается почти на половине их протяженности, с чем связана высокая аварийность движения в округе. В значительной степени такое положение обусловлено природно-климатическими условиями в регионе, которые на большей части территории Дальнего Востока характеризуются как весьма суровые и даже экстремальные.

Прогнозируемые климатические изменения усугубят проблемы, связанные с эксплуатацией и строительством новых объектов транспортной инфраструктуры. Рост температуры воздуха, с одной стороны, может принести определенную выгоду: улучшение ледовой обстановки на севере округа позволит увеличить грузооборот в арктических морях по Северному морскому пути, увеличится

и период навигации внутреннего водного транспорта, играющего значительную роль в этом регионе (при недостаточно развитой авто- и железнодорожной инфраструктуре обеспеченность Дальнего Востока судоходными речными путями в 3 раза выше среднероссийского уровня).

В то же время подъем температуры провоцирует таяние вечномёрзлых грунтов, оказывая негативное воздействие на транспортную инфраструктуру, включая аэродромы, автомобильные дороги. Увеличение мощности сезонного протаивания и деградации вечной мерзлоты уже сейчас приводит к росту числа случаев деформации и разрушения трубопроводов, а такие опасные процессы как оползни на оттаивающих склонах и медленное течение талого грунта (солифлюкация) будут только усиливаться. В ДФО деструктивные геокриологические процессы и явления распространяются почти на всей на территории Якутии и Чукотки.

К другим негативным последствиям подъема температуры относятся:

- интенсивное таяние ледников, что спровоцирует рост числа селевых потоков, формирующихся в основном на северо-западе округа, в Амурской области, на Сахалине и Камчатке;

- увеличение числа дней с температурой выше 30 °С в южной части ДФО (в Амурской области, Еврейской а. обл. и Хабаровском крае) и в центральной части республики Саха. Такие температуры, помимо технологических проблем (удлинение рельсов, распад органических изоляционных материалов, деформация автодорожного полотна и др.), могут вызывать и ухудшение физического состояния водителей, что провоцирует рост дорожно-транспортных происшествий;

- сокращение эксплуатационных сроков и пропускной способности зимних (ледовых) дорог.

Значительное негативное влияние окажет и прогнозируемое (Хлебникова и др., 2019б) к середине столетия увеличение максимальной интенсивности и суточного максимума осадков во влажные периоды как теплого, так и холодного сезонов года. Наибольшая повторяемость сильных дождей отмечается

в Приморском и Хабаровском краях, на Сахалине и Камчатке (рис. 25 а, б).

Сильные дожди сопровождаются дождевыми наводнениями и паводками, которые наносят значительный ущерб транспортным коммуникациям. На территории ДФО наводнения являются одним из наиболее часто повторяющихся и опасных по масштабам наносимого ущерба стихийных бедствий. Особенно значительными по масштабу и ущербу являются вызванные тайфунами ливневые наводнения в Приморском крае и Амурской области.

В холодный период года возрастет повторяемость сильных снегопадов, которые оказывают парализующее воздействие на автомобильное и железнодорожное движение. Территория ДФО характеризуется высокой частотой и интенсивностью снегопадов на Сахалине, Курилах и Камчатке (максимальный суточный прирост снежного покрова в этих районах — до 70–80 см).

Сильный ветер, характерный для прибрежных регионов округа, и обильные снегопады станут причиной увеличения повторяемости и интенсивности снежных заносов, при которых не работают аэропорты, прекращается автомобильное и железнодорожное сообщение. В округе максимальные объемы снегозаносов характерны для арктических районов Якутии, прибрежных районов Чукотки, Камчатки и Магаданской области, где объем снеготложений может достигать 1000 м³ на погонный метр.

Приволжский федеральный округ. Транспортная сеть ПФО представлена железнодорожным, автомобильным, речным и авиационным видами транспорта. По его территории проходят автомобильные и железные дороги, связывающие Центральный и Северо-Западный федеральные округа с Уральским, Сибирским и Дальневосточным, а также с Республикой Казахстан. В Приволжском федеральном округе расположено 20 аэропортов. Основными речными транспортными магистралями являются реки Волга, Кама, Белая. По территории проходят крупные нефте- и газопроводы российского и международного значения.

Проявления изменения климата на работу транспортной инфраструктуры в этом регионе будут определяться, прежде всего, ожидаемым ростом опасных метеорологических явлений: сильного ветра, града, гроз и т. д.

Изменение температурно-влажностного режима теплого периода будет наиболее заметно влиять на функционирование наземного транспорта на юге региона, где ожидается рост температур в среднем на 2–3 °С. В Оренбургской и Саратовской областях, где число дней с температурой воздуха выше 30 °С составляет около 25–28 дней, а на границе с Казахстаном доходит до 45–50 дней, работа наземного транспорта будет еще более осложнена: увеличится число дней с ограничением движения для большегрузов по дорогам федерального значения (особенно на трассах М-5 «Урал» и А-305 «Оренбург – Илек – Республика Казахстан»), возможен сбой в расписании движения поездов на Куйбышевской железной дороге (рис. 27Г).

Функционирование водного транспорта в настоящее время затруднено в связи с маловодностью рек Волжско-Камского бассейна. Рост температуры воздуха на фоне уменьшения осадков теплого периода (Хлебникова и др., 2019б) на большей части округа уменьшит летний сток. Снижение водности рек усилит аккумулятивные процессы в реках и вызовет их дополнительное обмеление. Все эти процессы будут оказывать негативное влияние на судоходство. Начиная с 2003 г. идет снижение минимального (летне-осеннего) стока и в Башкирии. В первую очередь, это объясняется уменьшением количества осадков в летний период (засуха 2010 и 2012 гг.) и увеличением глубины залегания грунтовых вод — основных источников питания рек в период летне-осенней межени (Галиуллина, 2018).

Наиболее благоприятный прогноз — на севере округа: увеличение количества зимних осадков, подъем температуры холодного периода, поздний ледостав приведут к росту зимнего стока и увеличению водности р. Камы.

Северо-Западный федеральный округ. Благодаря уникальному географическому положению и непосредственной близости к странам ЕС через СЗФО проходит существенная доля международных грузов страны в рамках международных транспортных коридоров. Здесь достаточно развитая сеть железных и автомобильных дорог. Морской транспорт играет важную роль, особенно в труднодоступных районах Крайнего Севера. Внутренний водный транспорт имеет значение для Архангельской области, Республики Коми и Ненецкого автономного округа, где сеть железных и автомобильных дорог недостаточно развита. Регионы, расположенные севернее Полярного круга, включают целый ряд районов, доступность которых обеспечивается только посредством воздушного транспорта. В Республике Коми, Архангельской и Мурманской областях, Ненецком автономном округе обслуживание отдаленных населенных пунктов осуществляется преимущественно воздушным транспортом. Аэропортовый комплекс включает в себя 66 аэропортов, в том числе 7 международных.

Наиболее благоприятно скажется изменение климата на функционировании внутреннего водного транспорта. Прогнозируемое увеличение среднегодовой температуры повлечет за собой удлинение навигации на всех реках севера региона в пределах 1 месяца. По некоторым оценкам (Смолина, 2009), возрастет зимний меженный сток за счет увеличения продолжительности периодов оттепелей и повышения грунтового питания. Снизится доля весеннего половодья в общем объеме стока воды (примерно с 60 до 50 %), возрастет сток в летне-осеннюю межень за счет увеличения доли жидких осадков (с 65 до 70–75 % по отношению к годовой сумме). В целом на севере региона ожидаются благоприятные условия и для морского судоходства в связи с уменьшением ледовитости Белого и Баренцева морей и увеличением ежегодного периода с открытой водой, свободной ото льда, что будет определять удешевление морских перевозок в Арктике. Все это положительно скажется на условиях судоходства. В Новгородской, Ленинградской, Вологодской и на юге Архангельской области повышение зимних температур может оказать положительное влияние на эксплуатационную надежность

транспортных средств. Затраты на содержание, техническое обслуживание и ремонт, расходные материалы и запасные части будут уменьшаться ввиду снижения частоты отказов техники.

К неблагоприятным факторам относятся:

– сокращение времени использования зимних дорог («зимников») на севере региона. Повышение температуры воздуха в зимний период и более частые оттепели приведут к регулярному оттаиванию «зимников» в начале и конце зимы, что повлечет за собой возникновение аварийных ситуаций;

– более частое возникновение гололедицы на дорогах, связанное с увеличением чередования оттепелей и заморозков и, как следствие, повышение числа аварий, снижение пропускной способности и больший износ дорог (рис. 29б);

– рост повторяемости сильных паводков и ледовых заторов, вызывающих разрушение дорог и мостов, в связи с ожидаемым на территории СЗФО к середине XXI в. ростом повторяемости и интенсивности волн тепла.

Северо-Кавказский федеральный округ. Транспорт — одна из ведущих отраслей экономики СКФО, на долю которой приходится около 10 % валового регионального продукта. По территории округа проходят главные направления Северо-Кавказской железной дороги, здесь проложено 23 974 км автодорог общего пользования. На территории округа расположено 7 аэропортов, а Махачкалинский морской торговый порт является одним из основных звеньев системы транспортной коммуникации на Каспийском море. Разветвленную сеть имеет трубопроводный транспорт: по территории района проходят трубопроводы «Каспийский трубопроводный консорциум», «Баку – Новороссийск» и участок «Голубого потока».

Основными проблемами дорожной инфраструктуры, связанными с погодно-климатическими условиями, являются высокие летние температуры в ряде субъектов региона, селявая и лавинная обстановка в горных и предгорных районах. Также для СКФО характерны самые значительные в России образования гололедно-изморозевых отложений и их наибольшая продолжительность.

Наблюдаемые и прогнозируемые изменения термического и влажностного режимов на территории СКФО (Хлебникова и др., 2019а, Хлебникова и др., 2019б) будут оказывать негативное влияние на транспортную отрасль региона. Повышение температуры в летний сезон приведет к росту числа дней с экстремально высокими температурами. Уже сейчас в районе расположения трасс федерального значения «Астрахань – Ставрополь» и «Астрахань – Махачкала» отмечается в среднем более 50 дней с температурами выше 30 °С, что тормозит работу тяжеловесных транспортных средств, движение которых ограничивается при значениях дневной температуры воздуха свыше 32 °С. Возможна деформация путей Северо-Кавказской железной дороги, особенно на участках Ставрополь – Элиста и Кизляр – Олейниково.

Ожидаемые изменения режима осадков также скажутся крайне негативно для транспортной отрасли, особенно в горах и предгорьях округа (Хлебникова, Салль, 2012). Повысится опасность образования селевых потоков, разрушающих объекты транспортной инфраструктуры, так как для территории Северного Кавказа наиболее характерны сели дождевого генезиса. Самый большой ущерб от селевых процессов отмечается в Кабардино-Балкарии и Северной Осетии, где сосредоточены участки самых значительных разрушений транспортных коммуникаций, связанных с селями, и именно в этих районах ожидается увеличение количества летних осадков до 30 %. В Ставропольском крае увеличится паводковая опасность. Сейчас здесь подвержены затоплению участки, расположенные на федеральных автодорогах «Астрахань – Ставрополь» и «Кочубей – Минеральные Воды». В случае продолжительных осадков возможно возникновение остропикового половодья на реках Малка, Чегем, Черк, Терек и др.

Зимой прогнозируется увеличение сумм осадков вдоль всего хребта Большого Кавказа (рис. 20в). Обильные снегопады спровоцируют еще большую опасность схода снежных лавин, так как в целом для этого региона 75 % лавин по генетическому типу относятся к лавинам, сходящим во время снегопадов. Самым лавиноопасным районом на Северном Кавказе является

Транскавказская магистраль, где на 28 км от Буруна до Северного Портала расположено более 200 лавинных очагов.

Сибирский федеральный округ. Транспортный комплекс в СФО развит недостаточно. Основной вид транспорта — железнодорожный. Транссибирская магистраль, важнейшая железная дорога России, пересекает территорию Новосибирской и Кемеровской областей. Сеть автомобильных дорог в регионе развита слабо, автомобильный транспорт обслуживает только внутренние перевозки, но в настоящее время в сложных природно-климатических условиях Томской области осуществляется строительство Северной широтной дороги «Томск – Ханты-Мансийск», призванной связать регион с северной частью ЕТР. Водный транспорт представлен перевозками в основном лесных, минеральных, строительных грузов по Оби, Енисею, Ангаре, Иртышу, Лене и их притокам. Большое значение имеет Северный морской путь, который обеспечивает снабжение и вывоз продукции северных территорий. Трубопроводный транспорт представлен магистральными нефтепроводами «Нижевартовск – Анжеро-Судженск – Красноярск», «Туймазы – Омск – Новосибирск – Ангарск».

Большая часть СФО расположена в зоне вечной мерзлоты. В этих районах находится развитая система трубопроводов, подверженных воздействиям опасных геокриологических процессов. Кроме этого, в условиях прогнозируемого увеличения годового и сезонного стоков на реках Сибири и изменения их ледового режима значительно возрастут нагрузки на подводные трубопроводы, особенно в Красноярском крае, Тюменской, Новосибирской, Омской, Томской и Иркутской областях. Это приведет к повышению вероятности аварийных повреждений трубопроводов, вплоть до их разрывов (с разливами нефти и выбросами газа).

Прогнозируемый рост среднегодового количества осадков преимущественно за счет их увеличения в холодный период (рис. 20г) вызовет повышенную опасность весенних половодий на реках водосбора Енисея.

В районах с высокими уровнями весеннего и весенне-летнего половодья на реках юга Западной Сибири в отдельные годы может

сформироваться половодье, максимум которого в 5 раз превышает среднемноголетний максимальный расход. Рост осадков летнего периода увеличивает риск опасных паводков. Для большинства субъектов Сибирского федерального округа паводки имеют меньшую значимость, чем весеннее половодье. Однако в последние годы они все чаще принимают чрезвычайный характер (паводок в Новокузнецке в октябре 2019 г.), и, возможно, в будущем на территории СФО значимость паводков будет возрастать (Игнатьева, Кнауб, 2020).

Основной проблемой для транспортной инфраструктуры рассматриваемого региона станет увеличение повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды: селей (Алтайский край и республика Тыва), природных пожаров, как лесных (Иркутская область, Красноярский край), так и торфяных (Новосибирская, Омская и Томская области), половодий (весь юг региона), смерчей, вихрей, шквалов, сильных ветров (республика Тыва, Омская область), продолжительных и интенсивных метелей (северные районы).

Уральский федеральный округ. Уральский регион расположен на важнейших грузонапряженных транспортных магистралях страны, соединяющих ее Европейскую и Азиатскую части, причем вытянутость района с севера на юг усиливает ее транзитное значение. Особенностью транспортно-логистического комплекса УФО является высокая обеспеченность автомобильными и железнодорожными магистралями южных областей и низкий уровень их развития на севере, прежде всего в ЯНАО, где более 50 % добываемых углеводородных ресурсов транспортируется трубопроводным транспортом. С частью труднодоступных малочисленных населенных пунктов полностью отсутствует наземное транспортное сообщение. Неоднородность транспортной освоенности территории районов при общей слабой развитости наземной транспортной инфраструктуры определяет важность воздушного транспорта — коэффициент авиационной подвижности населения в ЯНАО стабильно превышает среднероссийское значение (Стратегия социально-экономического развития..., 2021).

Особенность транспортной системы ЯНАО — эксплуатация и строительство («Северный широтный ход») самых северных железных дорог страны. Изменения климата, несмотря на самое интенсивное на территории России повышение здесь зимних температур (на п-ве Ямал до 8 °С к середине столетия согласно оценкам (Катцов и др., 2022)), будут оказывать здесь скорее негативное, чем положительное воздействие. Конечно, сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –25 °С приводит к уменьшению простоев в работе и положительно отражается на величине эксплуатационных расходов, но потепление здесь сопровождается, прежде всего, процессами, связанными с деградацией вечной мерзлоты.

Последние 50 лет южная граница распространения вечной мерзлоты у подстилающей поверхности сместилась к северу на 30–40 км. В Западной Сибири (территория Уренгойского месторождения) многолетнемерзлые породы на отдельных дренированных водоразделах протаяли до глубины 3–8 м от земной поверхности в полосе шириной около 100 км. Увеличение средней глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлой породы оказывает негативное влияние на устойчивость железнодорожной и автомобильной насыпи и вызывает деформации в опорах системы магистральных трубопроводов, увеличение расходов на ликвидацию ущерба, поддержание и обновление инфраструктурных объектов (линейных объектов, зданий и сооружений транспортно-логистического комплекса).

Для автомобильного транспорта серьезной проблемой станет сокращение продолжительности действия «зимников», уменьшающее транспортную связанность территории (за последние 30 лет период эксплуатации таких дорог сократился с 200 до 100 дней в году). Возникает проблема досягаемости удаленных поселков, нефтедобывающих и газодобывающих предприятий, так как альтернативный местный воздушный транспорт в этих районах развит недостаточно.

Ожидаемый рост количества зимних атмосферных осадков (рис. 22в) увеличит повторяемость метелей, которые и сейчас

характерны для прибрежных районов Ямала (где они могут продолжаться больше суток), блокируя работу наземного и авиационного транспорта.

Для транспортной системы южных районов УФО изменения температурно-влажностного комплекса могут спровоцировать увеличение повторяемости паводковых наводнений в Тюменской, Свердловской и Курганской областях, интенсивных снегопадов, а также роста опасности экстремальных гололедно-изморозевых отложений, характерных для данного региона.

Центральный федеральный округ. ЦФО располагает развитой транспортной системой. Отмечается высокая плотность железных и автомобильных дорог. От Москвы лучами расходятся в разных направлениях 11 железных дорог. В округе имеется густая сеть автомобильных дорог разного подчинения, так как он занимает выгодное географическое положение, и по его территории проходят транзитные автотранспортные коридоры в направлении север – юг и запад – восток. Большое значение имеют водные пути благодаря наличию единой глубоководной системы Волго-Балтийского, Московско-Волжского и Волго-Донского каналов. В ЦФО 28 аэродромов и 11 международных аэропортов. В пределах округа развит трубопроводный транспорт, представленный системой нефте- и газопроводов.

Значительную угрозу для транспортной инфраструктуры округа представляет прогнозируемый рост летних температур и, соответственно, повторяемости и интенсивности периодов с экстремально высокими температурами (Стадник и др., 2020).

Наиболее пострадают от роста экстремальных температур южные области региона (Курская, Брянская, Воронежская). В условиях большой загруженности автодорог, характерной для данного региона, такие температуры вызовут их быстрое разрушение, увеличение колеяности. Для железнодорожного транспорта жара также достаточно опасное явление, требующее ограничения скорости поезда, что приводит к значительным сбоям в расписании (пока это

единственный способ снижения риска схода с рельсов из-за искривления железнодорожного полотна).

Ожидается рост повторяемости гололедно-изморозевых отложений (ГИО) на дорогах, связанный с повышением зимних температур, увеличением числа случаев перехода температуры воздуха через 0 °С (рис. 43в) и количества осадков холодного периода. В настоящее время почти вся территория округа, за исключением Костромской и Ярославской областей, находится в зоне высокой опасности и риска образования ГИО.

На фоне сокращения количества осадков теплого периода для центральных и южных областей ЦФР здесь отмечаются тенденции к увеличению интенсивности осадков (Хлебникова и др., 2019б), в частности, к возрастанию суточного количества жидких осадков (рис. 38б). Ливневые осадки в Москве уже сейчас иногда приводят к необходимости закрытия аэропортов в связи с затоплением взлетной полосы, а в дальнейшем частота таких форс-мажорных обстоятельств будет только расти.

Северным областям округа (Смоленской, Тверской и Ярославской), угрожает рост паводковой опасности в связи с увеличением здесь количества осадков летнего периода. Паводки приносят большие убытки транспортной инфраструктуре в связи с возможным затоплением низких участков дороги и размывом дорожного полотна.

Изменения климата не окажут существенного влияния на водный транспорт региона — большинство судоходных рек (притоков Волги) находится в подпоре от волжских водохранилищ, поэтому изменение их водности не приведет к росту глубин и изменению условий судоходства (Смолина, 2009).

Южный федеральный округ. Транспортный комплекс — важнейший сектор экономики ЮФО, имеющий как общероссийское, так и межрегиональное значение, так как благодаря географическому положению он обладает значительным транзитным потенциалом перевозки грузов и пассажиров. Протяженность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием составляет 106 014 км.

По территории округа проходит Северо-Кавказская железная дорога. Важную роль в экономике округа играет водный транспорт: на его территории расположено 17 морских и речных портов, а порты Краснодарского края обеспечивают переработку более 40 % внешнеторговых грузов России, перевозимых морским флотом. Трубопроводный транспорт представлен международным магистральным нефтепроводом «Тенгиз – Новороссийск» и магистральным газопроводом «Россия – Турция» («Голубой поток»), а также рядом региональных нефте- и газопроводов.

Столь развитая транспортная сеть и высокая повторяемость разных видов опасных метеорологических явлений определяет высокий уровень погодно-климатических рисков для транспортной отрасли ЮФО. В зимний период на территории округа возможны обильные снегопады, сопровождаемые сильными ветрами и снежными заносами. В Краснодарском крае на территории Черноморского побережья отмечается высокая степень опасности гололедно-изморозевых отложений, создающих угрозы для автотранспорта, нарушающих работу портов, особенно порта Новороссийск. В горных районах Крыма часто прекращается движение автотранспорта. Так, дорога на гору Ай-Петри в Южном Крыму часто закрыта в зимние месяцы для всех видов транспорта, за исключением внедорожников с шипованными шинами и цепями противоскольжения. По значениям непрерывной и суммарной продолжительности ГИО выделяется республика Калмыкия, где продолжительность обледенения составляет более 1000 ч в год. Прогнозируемое повышение зимней температуры и увеличение количества зимних осадков увеличит повторяемость условий возможного образования ГИО к середине XXI в. Особенно резко возрастет количество дней с такими условиями в северных районах Ростовской и на всей территории Волгоградской областей (более 20 %).

В летний период особенностью территории ЮФО является повышенная вероятность аномально высоких температур. Наибольшая вероятность аномально жарких условий отмечается на территориях Калмыкии, Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей. Непрерывная продолжительность периода

с температурами выше 30 °С увеличивается в направлении с ЮЗ на СВ, достигая 20 ч в Волгограде, что является причиной задержки поездов в этом регионе иногда до 5–7 ч и аварий на железной дороге из-за искривления рельсов.

Одним из опасных процессов для транспорта на территории округа являются пыльные бури (ПБ). Наибольшее распространение ПБ получили на Нижнем Дону, в нижнем Поволжье, а наиболее частому и интенсивному их воздействию подвергаются Калмыкия, Ростовская и Волгоградская области. Пыльные бури влияют на безопасность движения, нередко становясь причиной ДТП, с ними связано закрытие аэропортов, прекращение движения по трассам. Причиной ПБ являются сильная жара и ветер. На фоне прогнозируемого роста температуры жарких 30-дневок и увеличения периодов без осадков на 3–4 дня (Хлебникова и др., 2019а), уменьшения осадков теплого периода на 5–10 % (до 20 % в Астраханской области) к середине XXI в. (рис. 24в, 39г) на всей территории ЮФО, за исключением районов Черноморского побережья Кавказа, ожидается рост повторяемости негативных явлений теплого периода, связанных с ПБ.

Территория ЮФО — один из наиболее ливнеопасных регионов России. Для побережья Черного моря характерны частые и интенсивные ливни до 200 мм/сут. Также опасны побережье Азовского моря в пределах Краснодарского края, республика Адыгея. Поэтому прогнозируемый рост максимальной суточной интенсивности осадков в Азовско-Черноморском регионе (рис. 39е) представляет большую опасность для автомобильного и железнодорожного транспорта, так как влечет за собой повышение вероятности ливневых наводнений и, как следствие, разрушение объектов транспортной инфраструктуры.

2.3 Производство и передача энергии

Дальневосточный федеральный округ. Основные энергетические мощности Дальнего Востока сосредоточены в южной части района, где они соединены в общую энергосистему. Энергосистемы северных территорий работают изолированно, обеспечивая локальных

потребителей. Наиболее крупной ГРЭС является работающая на местном угле Приморская ГРЭС. Многочисленные ТЭЦ и дизельные станции расположены в северной части округа. В Чукотском а. окр. действует небольшая Билибинская АЭС. Это единственная атомная электростанция, построенная в зоне вечной мерзлоты. Последствия таяния многолетней мерзлоты в районе расположения Билибинской АЭС носят комплексный характер и обуславливают риски как для целостности самих агрегатов электростанции, так и для транспортной инфраструктуры, что может нарушить нормальное снабжение АЭС.

Изменение климата на территории округа выражается в увеличении повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений: экстремальных осадков, приводящих к наводнениям (Амурская область, Приморский и Хабаровский края), занормативных снеговых (Сахалинская область, Камчатский край) и ветровых (Забайкальский край, республика Бурятия) нагрузок, а также высокой степени пожароопасности (Амурская область, Забайкальский край, Чукотский а.окр.) (рис. 2).

В последние годы наблюдается рост числа природных пожаров и в арктической зоне ФО. Так, в 2020 г. впервые зафиксирован лесной пожар в Якутии на территории, расположенной за Северным полярным кругом. Все виды ОЯ представляют значительную угрозу для нормального функционирования энергетических объектов, включая ЛЭП, обеспечивающих внешнее энергоснабжение электростанций.

По данным сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима, к середине XXI в. на территории Дальневосточного ФО ожидается рост температуры наиболее жаркого месяца, который составит около 3 °С по сравнению с 1990–1999 гг. (Хлебникова и др., 2019а), что может спровоцировать дальнейшее усиление пожароопасности, несущей угрозу функционированию АЭС (рис. 26д). Кроме того, к середине века на большей части округа следует ожидать увеличения максимальной суточной интенсивности осадков на 10–20 % (Хлебникова и др., 2019б) (рис. 25б).

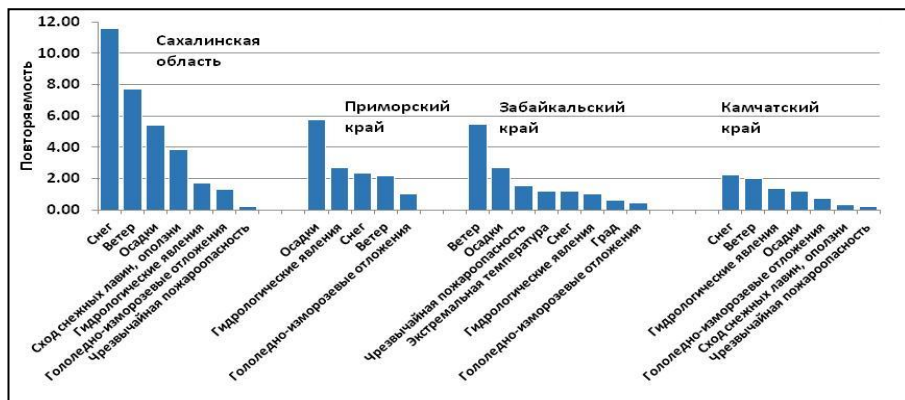


Рис. 40. Повторяемость различных видов опасных явлений, нанесших экономические ущербы в отдельных субъектах ДФО в 1991–2019 гг., число случаев в год

Приведенные данные говорят о необходимости детального учета наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических, гидрологических, геокриологических параметров при строительстве новых мощностей и модернизации оборудования уже действующих электростанций и ЛЭП для адаптации энергетического комплекса Дальневосточного ФО к наблюдаемым и ожидаемым в будущем климатическим изменениям. Кроме того, целесообразно дальнейшее совершенствование систем мониторинга и оповещения об опасных гидрометеорологических ситуациях, а также улучшение планирования противопожарных мероприятий (прежде всего, меры по профилактике лесных пожаров и восстановлению лесов).

Главная особенность дальневосточной энергетики — изолированность территорий. Альтернативные источники энергии (ветер, солнце, биомасса и местные виды топлива) позволяют решать проблему зон децентрализованного электроснабжения, которые составляют более 75 % территории Дальнего Востока.

Солнце — ключевой возобновляемый ресурс региона, валовый потенциал которого составляет 813 200 млн, технический — 3 224,4 млн, экономический — 0,132 млн т. у. т. в год (Арутюнов,

2010). Однако не во всех регионах округа этот потенциал активно реализуется.

Согласно районированию территории России по природному потенциалу гелиоэнергетических ресурсов, южные районы ДФО (Приморский край, юг Хабаровского края, Амурская область, юго-восток Забайкалья) относятся к первому, т. е. приоритетному району (Климатические факторы..., 2010). В западных районах Приморского края годовое количество поступающей на земную поверхность суммарной радиации составляет $1450 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что является максимальным для территории России и составляет 70–75 % от возможной радиации. Продолжительность солнечного сияния — до 2150 ч в год. Количество энергии, которое может вырабатывать фотоэлектрическая батарея при КПД фотогенератора 15 %, составляет $250\text{--}290 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, при использовании систем слежения за солнцем удельная выработка электроэнергии возрастает до $350\text{--}380 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Несмотря на такой огромный потенциал, рынок солнечной энергии в южных районах округа практически не развит. В настоящее время в Забайкалье функционирует единственная солнечная электростанция мощностью 150 кВт. Солнечные батареи в Забайкальском крае используют в качестве источника энергии для бытовых нужд, для обеспечения электроэнергией фермерских хозяйств, а в комплексе с ветрогенераторами — для освещения дорог. Более интенсивное развитие гелиоэнергетики происходит в Бурятии, где введена в эксплуатацию Торейская солнечная электростанция мощностью 45 МВт, которая станет крупнейшим объектом солнечной генерации в регионе. В южных районах Хабаровского края гелиоэнергетические установки используют для подогрева воды, технологических нужд, получения электрической энергии для индивидуальных потребителей в домах коттеджной застройки. Всего в крае смонтированы гелиоэнергетические установки общей мощностью более 100 кВт (Панкратьева, 2019).

Лидером по использованию солнечной энергии на Дальнем Востоке является Якутия, где в весенне-летний период, особенно в апреле и мае, месячные суммы суммарной радиации даже в ее северных районах так же высоки, как на Северном Кавказе

и в Астраханской области — более $165 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. В Якутии солнечных станций больше, чем где бы то ни было в ДФО. Здесь в отдаленных населенных пунктах построено 13 солнечных станций, работающих в связке с дизельными электростанциями (ДЭС). В 2015 г. в поселке Батагай Верхоянского улуса введена в эксплуатацию солнечная электрическая станция с установленной мощностью 1 МВт — одна из самых крупных на Дальнем Востоке и единственная такой мощности за Полярным кругом. Батагайская СЭС внесена в Книгу рекордов как самая северная станция. Оборудование станции рассчитано на работу в экстремальных климатических условиях, когда температура летом поднимается до $+45$, а зимой падает до -50 °С. Экономия дизельного топлива за 5 месяцев эксплуатации солнечной станции составила 61,3 т или 3,5 млн руб. По проектным данным годовая экономия дизельного топлива составляет 300 т.

Второй перспективный ресурс ДФО — ветер, валовый потенциал которого составляет 535 839 млн, технический — 8 396 млн, экономический — 4,2 млн т. у. т. В Хабаровском крае территориями для использования энергии ветра являются побережья Охотского моря и Татарского пролива, долина р. Амур. В настоящее время в Хабаровском крае смонтировано более 500 ВЭУ разной мощности, которые используются для обеспечения электроэнергией удаленных от центрального электроснабжения объектов: лесозаготовительных, охотничьих и фермерских хозяйств, метео- и телекоммуникационных станций и геологических партий. В Приморском крае действует всего одна ветровая электростанция на острове Попова (залив Петра Великого) с суммарной мощностью 23 МВт. В других регионах края ветровая энергия не используется, даже во Владивостоке с его средней годовой скоростью ветра 5 м/с.

Удельная мощность ветроэнергетических ресурсов Якутии изменяется от 3 в континентальной части до $476 \text{ Вт}/\text{м}^2$ на побережье моря Лаптевых. По предварительным оценкам на территории Якутии, где среднегодовая скорость ветра достигает 4 м/с, потенциальные запасы энергии ветра составляют 15,6 млрд $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$ (Лукутин, Киушкина, 2006). В настоящее время в Якутии действует одна

экспериментальная ветровая электростанция в поселке Тикси (Бердин и др., 2017).

Большим ветровым потенциалом обладает полоса береговой линии п-ва Камчатка (74,4 тыс. МВт или 63 164 млрд кВт·ч/год). В настоящее время на Камчатке введены в строй 2 ветродизельных комплекса и ВЭС. Ветродизельные комплексы установлены на Чукотке, Командорских островах и Сахалине.

Огромные расстояния между районами округа и населенными пунктами стали причиной того, что на Дальнем Востоке не было создано единой энергосистемы (как в Европейской части или Сибири). На территории ДФО автономно действуют четыре крупных энергообъединения: энергосистемы Камчатки, Магадана, Сахалина и Чукотки. Амурская область, Еврейская а.обл., Хабаровский край и Якутия формируют объединенную энергосистему Востока.

В последние годы экономика Дальнего Востока заметно растет, и на этом фоне энергетическая отрасль нуждается в серьезной модернизации, поскольку электросетевое хозяйство Дальнего Востока характеризуется сильной изношенностью и является уязвимым местом энергетики. Слабая освоенность территорий, недостаток транспортной инфраструктуры, экстремальные климатические условия — всё это усложняет эксплуатацию и проектирование ЛЭП.

По данным энергоуправлений, входящих в объединенную энергосистему Востока, аварии на ЛЭП, обусловленные гололедно-изморозевыми отложениями и ветром, наблюдаются ежегодно. За последние 30 лет также наблюдается некоторый рост числа явлений, связанных с ветром, гололедом и грозами, которые наносят ущерб.

Согласно СП «Нагрузки и воздействия» (2016), на территории ДФО выделяются все районы по гололедным нагрузкам от I до V (особо опасного). Наиболее значительные отложения отмечаются на побережье морей. Однако большая часть территории ДФО отнесена к горным и малоизученным районам. Это связано с тем, что на Дальнем Востоке редкая сеть метеостанций, что затрудняет изучение гололедного и ветрового режимов. На территории ДФО наблюдаются значительные по величине гололедные отложения,

расчетные значения которых превышают нормативы, определенные в СП «Нагрузки и воздействия» (2016) и ПУЭ-7.

В 2020 г. по данным ПАО «Сахалинэнерго» в Сахалинской области зафиксировано несоответствие фактических климатических условий и значений, заложенных в проекты высоковольтных линий. Была зафиксирована толщина стенки гололеда 40 мм и скорость ветра 40 м/с при заложенных в проекте толщине 10 мм и скорости 37 м/с.

Адаптацией электросетевого хозяйства, прежде всего, является задача по модернизации существующих высоковольтных линий, поскольку большая часть из них была спроектирована по устаревшим нормативам. Поэтому необходимо уточнять климатические параметры в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных последних лет по репрезентативным метеостанциям, а также целесообразно привлекать микроклиматические подходы для более точной оценки климатических условий.

Приволжский федеральный округ. Электроэнергетика ПФО представлена всеми видами электростанций: тепловыми, гидравлическими, атомными. На ТЭС вырабатывается 59 % электроэнергии ПФО, на ГЭС — 25, на АЭС — 15 %. Наиболее крупными электростанциями являются Заинская (республика Татарстан) и Ириклинская ГРЭС (Оренбургская область), а также Балаковская (Саратовская область) и Димитровградская АЭС (Ульяновская область). Наблюдаемый рост максимальных температур воздуха и повторяемости жарких дней создает угрозу для эффективного охлаждения энергоблоков АЭС и ТЭС из-за роста температуры охлаждающей воды, что ведет к падению КПД и ухудшению функционирования технических систем защиты энергооборудования. Увеличивающееся испарение с поверхности водоемов-охладителей в ряде случаев может привести к нехватке воды нужной температуры. Кроме того, в более теплой воде активно размножаются моллюски и водоросли, которые оказывают негативное воздействие на работу систем технического водоснабжения АЭС.

По данным сценарного прогнозирования характеристик термического режима, к середине XXI в. на территории Приволжского

ФО ожидается дальнейший рост летних экстремумов, который составит около 3 °С по сравнению с 1990–1999 гг. (Хлебникова и др., 2019а). В южной части округа также ожидается уменьшение сумм осадков в летний период на 10–15 % и увеличение средней непрерывной продолжительности засушливых периодов примерно на 5 дней (Хлебникова и др., 2019б), что может обусловить дополнительные риски для систем охлаждения энергоблоков (рис. 18б, г, 27д, 28г).

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости детального учета наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений климатических параметров при проектировании новых АЭС и ТЭС и модернизации уже существующих энергетических объектов с целью повышения надежности и эффективности их функционирования в ближней и дальней перспективе.

Приволжский федеральный округ является крупнейшим промышленным регионом Российской Федерации и одним из лидеров по реализации программы по развитию возобновляемой энергетики. Валовые ресурсы возобновляемых источников энергии в целом по округу характеризуются следующим образом: солнечные ресурсы — 140,8 млрд, ветровые — 32,1 млрд, ресурсы биомассы — 31,8 млн, малая гидроэнергетика — 11,9 млн, запасы торфа — 413,8 млн т. у. т (Энергетическая стратегия..., 2009).

Наибольшими солнечными ресурсами обладают южные и юго-восточные районы округа. В Оренбургской, Саратовской и Самарской областях годовая продолжительность солнечного сияния — более 2000 ч, число солнечных дней за год — 280–290, количество солнечной радиации, поступающей на земную поверхность за год на 1 м², — около 1200 кВт·ч.

В Оренбургской области действует 10 солнечных электростанций (СЭС), из которых наиболее крупными являются Сорочинская мощностью 60 МВт и Новосергиевская мощностью 45 МВт. Строятся и проектируются еще несколько СЭС. В случае их реализации Оренбургская область станет одним из крупнейших производителей солнечной энергии в России. Еще одним крупным регионом по внедрению солнечных станций является Башкортостан, где 6 СЭС

введены в действие и одна строится. Солнечные электростанции работают в Саратовской и Самарской областях. По установленной мощности СЭС Приволжский федеральный округ занимает в России 2-е место после ЮФО (464,5 МВт).

Солнечные ресурсы Оренбургской области и Башкортостана имеют большой потенциал для получения тепловой энергии. В Оренбургской области удельная выработка тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами составляет 700–750 кВт·ч/м², в Башкортостане — 620–670 кВт·ч/м², коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения достигает 65 %.

Ветровая энергетика — перспективный климатозависимый сектор возобновляемой энергетики в ПФО. Наиболее благоприятные условия для развития ветроэнергетики имеются в центральной части ПФО (побережье Волги), на юго-востоке региона, на побережье Куйбышевского водохранилища. Повторяемость энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с), при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, составляет 60 %, а в Мордовии — более 80 % (Аухадеев, Переведенцев, 2016). В Приволжском федеральном округе действует 4 ВЭС, самые крупные из которых Ульяновская (Симбирская) мощностью 50 МВт и Ульяновская ВЭС-2 мощностью 35 МВт. Следует отметить, что Ульяновская область, где сформированы крупные ветропарки, является единственным регионом в Приволжском федеральном округе, где альтернативная энергетика имеет долю в производстве электроэнергии более 1 %.

В настоящее время во многих регионах округа, обладающих значительными запасами углеводородного сырья, в частности в Татарстане, отсутствуют значимые объекты альтернативной энергетики, или имеется только малая гидроэнергетика. Проекты строительства солнечных и ветровых электростанций рассматриваются лишь в перспективе.

Территория ПФО расположена в зоне централизованного энергоснабжения Российской Федерации. На бесперебойную работу сетевой инфраструктуры оказывают влияние различные метеорологические явления.

Согласно районированию (СП «Нагрузки и воздействия», 2016) большая часть ПФО (кроме Республики Башкортостан и Предуралья) расположена во II гололедном районе, который характеризуется небольшими гололедными нагрузками, но даже незначительные гололедные нагрузки при сильном ветре могут приводить к значительным авариям на ЛЭП. По данным ВНИИГМИ–МЦД гололедно-изморозевые отложения, которые нанесли ущерб, отмечаются на территории ПФО не каждый год, однако прослеживается тенденция к увеличению частоты этих явлений и увеличение числа дней с гололедом. В областях ПФО ежегодно наблюдаются ледяные дожди, что способствует образованию больших гололедных нагрузок на провода ВЛ на обширных территориях.

На всей территории округа отмечаются сильные ветры, которые наносят значительный ущерб (по данным ВНИИГМИ–МЦД). Кроме того, для территории ПФО характерно образование смерчей. Наиболее часто это наблюдается в Нижегородской и Пензенской областях, Республике Башкортостан и Чувашской Республике.

Все упомянутые явления создают риски аварий и отключений на линиях электропередач, которые необходимо предотвращать. Установление постов контроля за метеорологическими нагрузками (ветровыми и гололедными) позволят своевременно реагировать на угрозу возникновения аварий.

Северо-Западный федеральный округ. Электроэнергетика округа включает в себя две атомных электростанции (Ленинградскую и Кольскую), тепловые электростанции (наиболее крупная Киришская ГРЭС), гидроэлектростанции. Основная доля (65,5 %) генерирующих мощностей приходится на тепловые электростанции, работающие на органическом топливе. На атомные электростанции приходится 23,5 % установленной мощности, на гидроэлектростанции — 11 %. При изменении климата основными угрозами для ТЭС и особенно АЭС является выход из строя оборудования станций и снижение их КПД из-за аномально высоких температур воздуха и чрезмерного нагрева воды, используемой для охлаждения энергоблоков. Кроме того, представляет опасность повреждение линий электропередач,

по которым осуществляется внешнее энергоснабжение электростанций, при воздействии высоких ветровых и гололедных нагрузок, а также лесных пожаров. Так, например, 16 июля 2010 г. была наполовину снижена мощность энергоблока № 3 Ленинградской АЭС в связи с отключением от сети турбогенератора из-за неисправности в системе охлаждения, возникшей в условиях длительной аномальной жары (Турбогенератор ЛАЭС..., 2015). В июле–августе 2010 г. температура наиболее жаркой пятидневки в районе ЛАЭС превышала значения этого показателя для периода 1961–1990 гг. на 8 °С, а расчетные значения 98 % обеспеченности — на 3 °С. Длительные периоды с экстремально высокими температурами в последние 30 лет стали носить регулярный характер (Тюсов и др., 2017).

Результаты сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима говорят о вероятном усилении наблюдаемых тенденций (рис. 19б, 29д, 30г). К середине XXI в. в южной части СЗФО длительность наиболее продолжительной волны тепла может увеличиться на 8–9 дней, а повторяемость 5-дневных периодов с температурой выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для 1990–1999 гг., возрастет в 2–3 раза (Shkolnik et al., 2018; Тюсов и др., 2017). В связи с изменением температурного режима также ожидается рост повторяемости периодов с повышенной пожароопасностью. Возрастание числа суток с классом пожарной опасности II–V по комплексному показателю Нестерова к концу XXI в. может составить на территории СЗФО от 6 до 11 суток (Торжков и др., 2019).

Для адаптации ТЭС и АЭС к климатическим изменениям необходимо совершенствование конструкций электростанций с учетом наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений специализированных климатических параметров с целью снижения рисков аварий и повышения эффективности генерации энергии.

В Северо-Западном федеральном округе, занимающем практически всю северную половину Европейской территории России, имеются области с недостаточно развитой системой линий электропередач и транспортных коммуникаций. Кроме того, в регионе

расположено немало труднопроходимых болот. Вследствие всех этих обстоятельств многим населенным пунктам, расположенным в данной местности, остро необходимы локальные источники энергии, которые могли бы генерировать ее, работая в автономном режиме, и при этом имели бы возможность обходиться без привозного топлива.

Очевидно, что подобные энергетические потребности легче всего удовлетворить за счет относительно малых генерирующих мощностей с использованием возобновляемых источников энергии. На северо-западе России есть природный ресурс и технический потенциал для внедрения возобновляемых источников энергии, особенно биоэнергетических, ветровых и ресурсов торфа.

Развитие солнечной электроэнергетики в СЗФО при современном уровне технологий малоперспективно в связи с климатическими особенностями: годовая продолжительность солнечного сияния менее 1200 ч в северных областях округа и 1700 ч — в южных, суммарный годовой приход солнечной радиации 850 и 1050 кВт·ч/м² соответственно. Прямое использование солнечной энергии на северо-западе РФ целесообразно для осуществления низкотемпературных процессов, таких как нагрев воды с помощью солнечных тепловых коллекторов с последующим применением ее в системах горячего водоснабжения, рассчитанных на сезонный цикл пользования. Возможно получение небольших количеств электроэнергии с помощью фотоэлектрического преобразования солнечного излучения для локального потребления отдельных домов и коттеджей.

В СЗФО есть природный ресурс и технический потенциал для внедрения ветровых возобновляемых источников энергии. Округ характеризуется высоким уровнем теоретического (природно-климатического) потенциала ветровой энергии, однако ветроэнергетика СЗФО находится в стадии становления и пока развита слабо. Согласно АО «СО ЕЭС», на начало 2021 г. ее доля в установленной мощности объединенной энергосистемы региона не превышала 0,02 %.

Наиболее перспективными районами для строительства ВЭУ являются Ленинградская область (южное побережье Финского залива, юго-восточное побережье Ладожского озера), Калининградская

область (побережье Балтийского моря), Республика Карелия и Архангельская область (побережье Белого моря в районе Онежской и Двинской губы), Мурманская область (побережье Баренцева моря в районе Мурманска).

Среднегодовые скорости ветра в этих районах изменяются в диапазоне 3,2–4,9 м/с, в Терiberке (вблизи Мурманска) — 7,3 м/с. Повторяемость энергоактивных скоростей в среднем составляет 50–60 %, в Терiberке — около 80 %. Период в течение года, когда ВЭУ может работать в режиме номинальной мощности, составляет 25–45 %, в районе Мурманска — около 58 %.

Согласно расчетным оценкам в ближайшие десятилетия и середине XXI в. рост среднегодовой скорости ветра ожидается в прибрежных северных районах Европейской части до 10–15 %, а на Кольском полуострове — до 20 % (ОД2, 2014).

В настоящее время на территории СЗФО в эксплуатации находится одна ВЭС — Ушаковская (Калининградская область, 6,9 МВт) и небольшие ВЭУ мощностью до 1 МВт на коммерческих объектах. Идет активное проектирование и строительство новых ветропарков и ВЭС. С вводом в эксплуатацию Мурманской ВЭС, мощностью 200 МВт, на территории округа появится самый крупный ветропарк за Полярным кругом.

На территории СЗФО наблюдается большой процент аварий на линиях электропередач из-за неблагоприятных погодных условий. Причем наиболее значимыми климатическими факторами являются ветер, гололедно-изморозевые отложения и грозы.

На всей территории СЗФО наиболее часто отключение электроэнергии происходит из-за явлений, связанных с ветром. Наибольшая повторяемость таких явлений, которые нанесли ущерб, приходится на Мурманскую область. Однако, по данным за 2018 г. (Кондратьева и др., 2019), наибольшее количество отключений из-за ветра и гололеда произошло в Новгородской области. Наименьшее количество отключений из-за ветровой нагрузки наблюдалось на Кольском полуострове, поскольку в Мурманской области осуществляется постоянный мониторинг фактических метеоусловий.

При ухудшении погодных условий принимаются дополнительные меры по предотвращению нарушений электроснабжения.

В северных областях СЗФО в последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению повторяемости гололедных отложений и налипания мокрого снега, что приводит к авариям за счет увеличения нагрузки на провода.

Следует отметить уменьшение количества отключений ВЛ из-за гололедно-изморозевых отложений в Республике Коми, Псковской и Мурманской областях в связи с использованием новых усовершенствованных систем мониторинга гололедообразования и принятием мер по ликвидации снегоналипания в данных областях.

Северо-Кавказский федеральный округ. В структуре электроэнергетики Северокавказского ФО преобладают тепловые электростанции. Наиболее крупные из них — Ставропольская и Невинномысская ГРЭС. Второе место в системе генерации округа занимают ГЭС: на территории округа расположено более 20 больших и малых ГЭС. Негативное влияние меняющегося климата на функционирование тепловых станций выражается, прежде всего, в возрастании максимальных температур воздуха и увеличении длительности и повторяемости периодов с жаркой погодой.

Рост температуры воздуха ведет к нагреванию воды в прудах-охладителях и снижает эффективность генерации энергии. Водоемом-охладителем для Ставропольской ГРЭС является небольшое Новотроицкое водохранилище. Из-за увеличения испарения и более частых засушливых периодов в этом регионе возникают риски нехватки воды с температурой, необходимой для охлаждения агрегатов ГРЭС, а, следовательно, снижения эффективности системы охлаждения и КПД электростанции (Промышленные системы охлаждения..., 2016). К середине XXI в. в этом регионе ожидается дальнейший рост летних температурных экстремумов, который составит около 3 °С по сравнению с 1990–1999 гг. (Хлебникова и др., 2019а) (рис. 38г).

Принимая во внимание высокий уровень изношенности электросетевой инфраструктуры и оборудования объектов генерации,

энергетика округа нуждается в масштабном обновлении с учетом детальной информации о современном и будущем климате. Энергобезопасность высокогорных и отдаленных районов Северокавказского ФО может быть повышена за счет более широкого использования возобновляемых источников энергии: малых ГЭС, ветро- и гелиоустановок. Однако надо иметь в виду, что малые ГЭС на горных реках вырабатывают энергию преимущественно в период половодья. Их недостатком является спад мощности в зимнее время года, когда энергопотребление растет. Это приводит к дефициту электроэнергии зимой и ее избытку летом. Поэтому для оптимизации энергетического баланса в этих районах необходим комплексный подход с привлечением всех возможных источников энергии и экономических оценок эффективности их использования.

СКФО испытывает дефицит электроэнергии, который со временем будет возрастать. Этот факт, а также необходимость повышения экологичности топливно-энергетического комплекса региона, где располагается много туристических и санитарно-курортных зон, делают проблему использования альтернативной энергетики в регионе чрезвычайно актуальной.

Северо-Кавказский регион обладает большими ресурсами солнечной энергии. Удельный валовый приход солнечной энергии составляет 1330–1390 кВт·ч/м² в год, однако широкого применения этой энергии в настоящее время нет. В Ставропольском крае действует Старомарьевская СЭС мощностью 25 МВт, строится Кисловодская СЭС суммарной пиковой мощности 24 МВт с прямым преобразованием солнечного излучения в электрическую энергию.

В Дагестане общий валовый потенциал ресурсов солнечной энергетики, составляющий 8,6 млрд т. у. т., только начинает реализовываться. Суммарная величина этого потенциала существенно превышает все актуальные и перспективные уровни потребления топливно-энергетических ресурсов в Дагестане вплоть до 2050 г. и позволяет решить проблемы его энергоснабжения на качественно новом уровне. В настоящее время вступила в строй солнечная электростанция установленной мощности 5 МВт в Каспийске,

и ведутся работы по проектированию еще двух СЭС общей мощностью 45 МВт.

В Республиках Дагестан и Ингушетия, в Ставропольском крае имеется большой потенциал для развития ветроэнергетики. Удельный валовый потенциал энергии ветра в этих регионах составляет 420, 245 и 175 кВт·ч/м² в год соответственно (Справочник..., 2010). Лидером по ветроэнергетике становится Ставропольский край. На его территории до конца 2021 г. предполагается ввести в действие 4 ветроэлектростанции: Кочубеевскую (210 МВт), Бондаревскую (120 МВт), Кармалиновскую (60 МВт), а также еще одну ВЭС мощностью 60 МВт в Труновском районе (<https://kavkaz.rbc.ru/kavkaz/freenews/5f71eae9a79476116c05716>).

Использование возобновляемых источников энергии для обеспечения экономической и энергетической безопасности в субъектах Северо-Кавказского федерального округа является весьма перспективным в силу природно-климатических условий региона и технико-экономического состояния топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

СКФО характеризуется наибольшим для территории России числом опасных явлений (грозы, сильные ветры, гололедные отложения), которые наносят большой ущерб для ВЛ.

На территории СКФО выделяется несколько гололедных и ветровых районов: от II до VI (СП «Нагрузки и воздействия», 2016). Кроме того, этот регион характеризуется интенсивной грозовой деятельностью. Неблагоприятные погодные условия могут приводить к перебоям в поставках электроэнергии. По данным ОАО СО ЕЭС (<https://minenergo.gov.ru/node/15274>), на линиях ПАО «Россети Северный Кавказ» основной причиной аварийности на объектах электросетевого хозяйства в 2019 г. стала низкая грозоупорность высоковольтной линии 110 кВ в V-м гололедном районе (предгорья Карачаево-Черкесской Республики и Республики Дагестан, восточный и западный районы Ставропольского края). Количество отключений значительно выросло по сравнению с 2018 г. (91 и 51 отключение соответственно).

Для высоковольтных линий опасны такие неблагоприятные явления погоды как сильный ветер и гололедно-изморозевые отложения. Именно они приводят к наиболее серьезным авариям на линиях электропередач, устранение последствий которых наиболее сложно. На территории Северо-Кавказского федерального округа опасные явления с ветром и гололедом, наносящие ущерб, наблюдаются ежегодно. За последние 30 лет отмечается рост повторяемости этих явлений.

Мерой адаптации к происходящим погодным явлениям могут служить дополнительные мероприятия по повышению грозоупорности высоковольтных линий, а также работы по повышению их надежности в условиях гололедообразования (применение систем плавки гололеда). В условиях происходящих изменений климата необходимо уточнение климатических нагрузок по данным ближайших метеостанций.

Сибирский федеральный округ. Электростанции сосредоточены преимущественно на юге СФО, прежде всего в Кузбассе и прилегающих к нему районах. ТЭС обеспечивают примерно 51 % выработки электроэнергии, а ГЭС — 49 %. Наиболее крупными ГРЭС являются Берёзовская и Назаровская, расположенные на юге Красноярского края и работающие на угле Канско-Ачинского бассейна, а также Беловская ГРЭС (Кемеровская область, Кузбасс). Наблюдаемое изменение климата, одним из проявлений которого в этом районе является увеличение интенсивности, повторяемости и длительности волн тепла, может привести к снижению эффективности охлаждения энергоблоков ТЭС и уменьшению выработки электроэнергии. Несмотря на снижение средних скоростей ветра, опасные явления, связанные с ветром, по-прежнему наносят наибольший ущерб на территории СФО. Высокие ветровые нагрузки могут создавать аварийные ситуации на ЛЭП и нарушать внешнее энергоснабжение электростанций. Эта проблема становится особенно актуальной в связи с большой степенью изношенности электросетей в этом регионе. По данным климатического моделирования,

к середине XXI в. ожидается дальнейший рост максимальных температур воздуха (рис. 41е).

На юге СФО вероятно увеличение максимальной длительности волн тепла на 5–6 дней (Shkolnik et al., 2018); периоды с экстремально жаркими температурами могут отмечаться 1–2 раза в год (Тюсов и др., 2017). Такое изменение температурного режима на территории округа увеличит вероятность высокой пожароопасности и смерчей, представляющих угрозу для агрегатов электростанций и для ЛЭП.

Для адаптации ТЭС при проведении комплексной оценки потенциальных угроз энергетической безопасности, назревающих внутри ТЭЖ и возникающих извне вследствие изменения внешних для энергетики условий (Смирнова, Сендеров, 2019), необходимо принимать во внимание и изменение значений климатических параметров, применяемых при проектировании и эксплуатации ТЭС и ЛЭП.

Необходимость развития возобновляемых источников энергии в СФО является одной из актуальных задач электроэнергетической отрасли в связи с острым энергетическим дефицитом во многих регионах и наличием большого числа населенных пунктов без централизованного энергоснабжения.

По данным (Концепция развития..., 1994), потенциал экономических ресурсов ВИЭ (в млрд кВт·ч ежегодного возобновления) оценивается следующим образом: ресурсы солнечной энергии — 16,05, ветровой энергетики — 10,2, гидроэнергетические ресурсы малой гидроэнергетики — 79,27, ресурсы энергии биомассы — 18,9, геотермальной энергии — 108,0.

Самым большим солнечным потенциалом в СФО обладает Алтайский край. Продолжительность солнечного сияния в этом регионе 1935–2170 ч в год, что выше, чем на тех же широтах Европейской территории России. Годовая суммарная радиация составляет 1330 кВт·ч/м² (Благовещенка). В летние месяцы величина суммарной радиации составляет около 65 % от возможной.

В крае действует несколько солнечных электростанций. По установленной мощности СЭС среди регионов округа Алтай стал лидером (120 МВт).

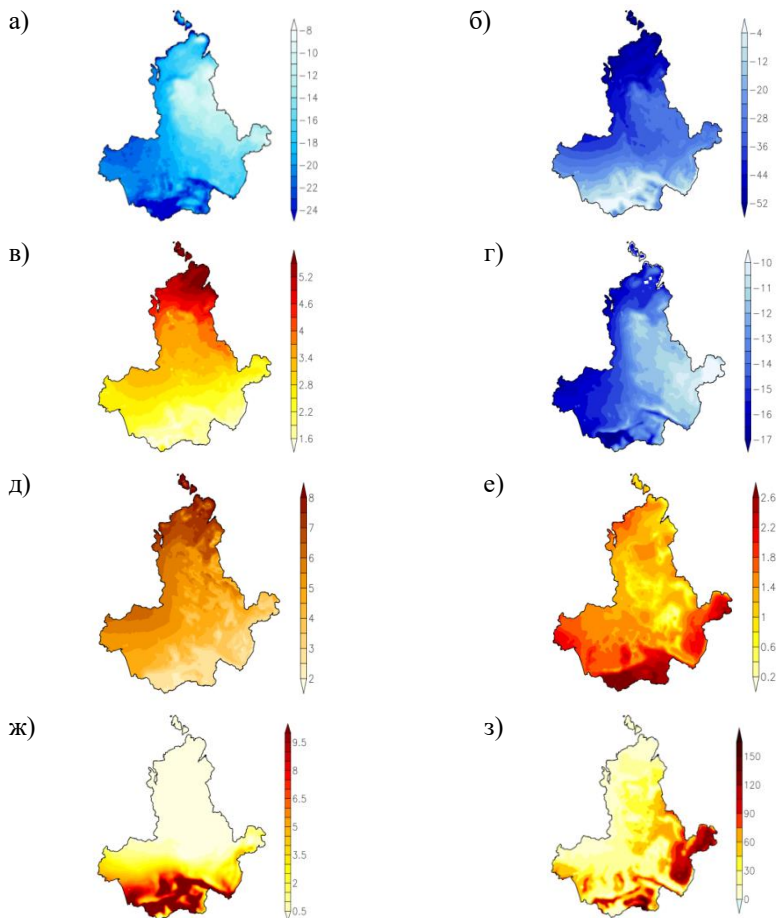


Рис. 41. СФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха, дни; б) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; в) средняя температура отопительного периода, $^{\circ}\text{C}$; г) градусо-сутки отопительного периода, %; д) температура наиболее холодной пятидневки, $^{\circ}\text{C}$; е) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$; ж) число дней с переходом температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, дни; з) дефицит холода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

В 2021 г. начаты строительно-монтажные работы на Нововаршавской солнечной электростанции в Омской области с установленной мощностью 30 МВт. В настоящее время Сибирский федеральный округ занимает 2-е место после Южного ФО по объему мощностей солнечных фотоэлектрических установок, введенных в эксплуатацию за последние 6 лет.

Удельная годовая выработка электроэнергии фотогенератором при КПД 15 % в южных районах округа достигает 270–290 кВт·ч/м². На территории края могут успешно эксплуатироваться солнечные коллекторы различных типов. В период с апреля по сентябрь удельная выработка тепловой энергии составляет 750–800 кВт·ч/м² (ОД2, 2014).

Согласно модельным прогнозам, ожидаемый к концу и середине XXI в. рост суммарной радиации до 2–4 % и температуры на 4–6 °С будет способствовать увеличению выработки тепловой энергии солнечными коллекторами. На производительность фотоэлектрических батарей изменения практически не повлияют.

Ветровая энергетика в СФО развита слабо по сравнению с солнечной, однако потенциал ветроэнергетики во многих регионах достаточен для ее развития. Согласно Генеральной схеме размещения ветроэнергетических станций Российской Федерации, юг Западной Сибири, в частности западная часть Алтайского края, являются одной из перспективных территорий (Энергетическая стратегия..., 2009). Анализ ветрового режима территории Алтайского края (Никольченко, Сухова, 2013; Котилко, Фарков, 2013) показал возможность строительства достаточно крупных ветроэнергопарков в степных районах Алтайского края.

Использование ветроэнергетических установок является важной составляющей устойчивого развития Алтайского региона. Оно позволит создать бескризисную самодостаточную автономную энергосистему и привлечь высококвалифицированных специалистов в энергетiku и промышленность края. Потребителями энергии ветра на территории края могут стать фермерские и крестьянские предприятия, сфера малого и среднего бизнеса, туристические базы, а также иные объекты рекреационной инфраструктуры.

В работе (Бастрон и др., 2015) рассмотрены возможности развития ветроэнергетики на территории муниципальных образований Красноярского края, самого большого региона СФО.

В Красноярском крае наибольшим ветровым потенциалом характеризуется его северная часть — Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, где средние годовые скорости ветра составляют 5–7 м/с, удельная мощность ветра — более 1200 Вт/м², годовая удельная потенциальная энергия ветра — более 7000 кВт·ч/м². Этот огромный потенциал практически не используется, поскольку на данной территории нет крупных потребителей, способных принимать нагрузку от ВЭУ большой мощности.

На сегодняшний день рекомендуемый для большей части Красноярского края диапазон мощностей ВЭУ составляет 1–1,5 МВт. Такие ВЭУ могут покрыть нагрузку небольшого предприятия или крупного поселка с децентрализованным энергоснабжением. Использование ВЭУ очень малой мощности (5–10 кВт и менее) возможно на территории всего Красноярского края при размещении ВЭУ на возвышенностях, равнинных местах или на границе крупных водоемов (например, Красноярского водохранилища). Производительность ВЭУ малой мощности на территории центральных и южных районов будет менее эффективной, чем на севере. В целом, малая ветроэнергетика позволит решать точечные задачи малых частных потребителей, но не сможет существенно повлиять на энергетическую политику в крае.

В округе предполагается принятие комплекса мер, направленных на существенное снижение негативного влияния деятельности предприятий энергетического сектора на окружающую среду, увеличение использования возобновляемых источников энергии для северных территорий, Прибайкалья и других районов децентрализованного электрообеспечения.

Объединенная энергосистема СФО состоит из 8 региональных энергетических систем, которые объединяют 10 субъектов РФ, входящих в состав округа. Электросеть ОЭС Сибири формирует линии электропередачи классом напряжения 110–1150 кВ и общей протяженностью 102 614 км (по данным на 01.01.2021 г.). Гололедные

нагрузки на территории всего СФО в основном незначительны (большая часть округа отнесена ко II району согласно СП «Нагрузки и воздействия» (2016)). Это связано с тем, что большая часть округа находится зимой под влиянием Сибирского антициклона, для которого характерны очень низкие температуры и слабые ветры. При таких погодных условиях образуется лишь кристаллическая изморозь, которая не создает больших нагрузок. Исключения составляют территории на побережье, где большая влажность и сильные ветры создают благоприятные условия для образования гололедных отложений, и территории Алтайского края и Республики Алтай, поскольку в горном рельефе также формируются условия для образования гололедных отложений.

Аварии на ЛЭП в СФО в основном связаны с такими явлениями как сильные ветры, смерчи, шквалы, грозы. На территории СФО отмечается тенденция к увеличению повторяемости неблагоприятных явлений с ветром и грозами, которые наносят ущерб. Наибольший вклад в эту повторяемость вносят явления, связанные с ветром (сильный ветер, смерч, шквал).

Вместе с тем стоит отметить, что на территории СФО увеличивается интенсивность грозовой деятельности, особенно в южных районах округа. В связи с этим увеличивается риск аварийных отключений на высоковольтных линиях из-за низкой грозоупорности.

Уральский федеральный округ. На территории УФО находится около 180 электростанций мощностью более 5 МВт. Наибольшее число электростанций сосредоточено в центральной части округа. ТЭС составляют 93,35 % от мощности электростанций региональной энергосистемы, ГЭС — 3,63, АЭС — 2,9 %. Наиболее крупными ГРЭС являются Рефтинская (Свердловская обл.) и Сургутская (Ханты-Мансийский а. окр.). В Свердловской области также расположена Белоярская АЭС. Рост максимальных температур воздуха и числа дней с жаркой погодой в центре и на юге округа (рис. 30) обуславливает риски нарушения нормальной работы систем охлаждения энергоблоков, что может привести к снижению

выработки электроэнергии вплоть до остановки электростанций в периоды длительной аномально жаркой погоды.

Кроме того, значительную угрозу для работы ТЭС и АЭС представляют участвовавшие опасные погодные явления (занормативные гололедно-ветровые нагрузки, смерчи, пожароопасные условия). В результате их воздействия могут возникнуть аварийные ситуации на ЛЭП и нарушиться внешнее энергоснабжение электростанций. Изменение ветрового режима, выражающееся, в частности, в увеличении повторяемости штилей, может привести к накоплению радиоактивных веществ в ближайшем окружении АЭС.

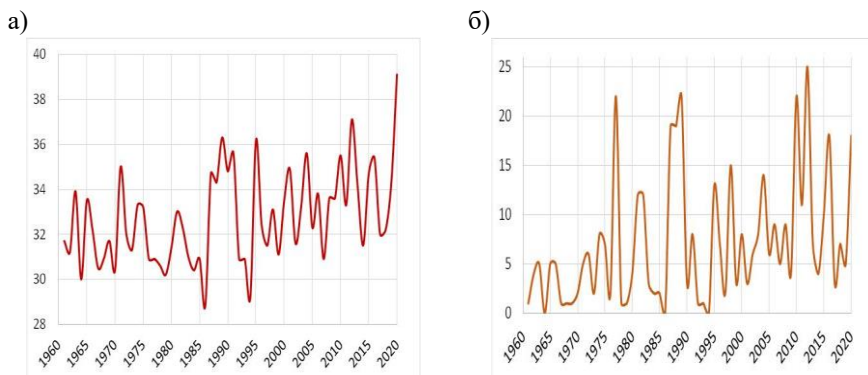


Рис. 42. Екатеринбург: а) максимальная температура воздуха, °С;
б) число дней с температурой воздуха выше 30 °С

Прогнозные оценки (Катцов и др., 2022) показывают, что к середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (рис. 45е). Для снижения уязвимости объектов энергетики округа необходимо обеспечить дополнительные возможности для охлаждения рабочих блоков электростанций, провести модернизацию ЛЭП в соответствии с изменяющимися климатическими условиями, а также сделать более надежной работу очистительных систем, чтобы свести к минимуму возможное загрязнение воздуха.

В Уральском федеральном округе альтернативная энергетика в настоящее время существует на уровне экспериментальных проектов. Однако имеется необходимость ее развития, особенно в децентрализованном секторе энергоснабжения, который занимает значительную северо-восточную часть округа. По уровню развития альтернативной энергетике УФО значительно уступает СФО и ДФО. Так, например, в УФО при огромной доле природоёмких отраслей в экономике и высоком уровне антропогенного загрязнения доля альтернативной энергетике в общем энергобалансе в 50 раз меньше, чем в ДФО. Общий объем выбросов парниковых газов от деятельности традиционной электроэнергетики, определенный с помощью методики МГЭИК, в УФО составил 73,91 млн т CO₂-экв. При замещении энергетике на ископаемом топливе альтернативными источниками можно не только решать энергетические проблемы в удаленных регионах из-за недостатка инфраструктуры, но и значительно понизить уровень негативного антропогенного воздействия на окружающую среду (Двинин, 2019).

В Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах, а также в Тюменской области большие запасы нефти и природного газа оказали негативное влияние на темпы развития альтернативной энергетике. В Тюменской области практически отсутствуют крупные объекты, которые можно отнести к альтернативной энергетике. В Ямало-Ненецком округе, обладающем очень высоким ветровым потенциалом (на Ямале он превышает 700 Вт/м²), для устранения энергодефицита региона существует проект строительства 11 ветровых электростанций, однако в настоящее время реализована лишь одна ВЭУ с ежегодной выработкой электроэнергии 0,54 млн кВт·ч и мощностью 0,25 МВт. Другим значимым проектом ВИЭ является использование ветро- и солнечных генераторов на газовых промыслах.

Свердловская область является регионом, где сконцентрирован ряд весьма значимых для энергетике страны энергообъектов. При этом данный регион обладает существенным техническим и экономическим потенциалом для развития возобновляемой энергетике (Шеклеин, Велькин, 2012), особенно малой

гидроэнергетики, поскольку в области есть большая сеть малых рек и система водохранилищ. В северной и горной частях территории области имеются зоны с хорошей ветровой обеспеченностью, где средние годовые скорости ветра находятся на уровне 5–10 м/с, что позволяет рассматривать возможность сооружения ветровых электростанций (ВЭС).

Южные районы Свердловской и Тюменской областей, Челябинская и Курганская области обладают достаточно большими солнечными ресурсами. Годовая продолжительность солнечного сияния в этих регионах не менее 1900 ч, годовой приход солнечной радиации — 1000–1100 кВт ч/м².

На сегодняшний день потенциал ветровых и солнечных ресурсов УФО не реализован. В Челябинской области планируется к введению солнечная электростанция мощностью 244 кВт. В Курганской области существует проект строительства относительно крупной Шумихинской ВЭС мощностью до 50 МВт, однако проект пока не реализован.

Принятая Стратегия развития топливно-энергетического комплекса Свердловской области до 2020 года нацелена на разработку механизмов поддержки и стимулирования использования ВИЭ.

Согласно СП «Нагрузки и воздействия» (2016), гололедные нагрузки на территории всего округа в основном незначительны (большая часть округа отнесена ко II и III району). В горных районах выделяется IV и V (особо опасный) районы, где большая гололедная нагрузка может приводить к аварийным отключениям на электросетях.

Грозовая деятельность на большей части округа не превышает в среднем 60 ч в год, а в некоторых районах имеет тенденцию к уменьшению.

Ежегодно во всем УФО наблюдаются явления, связанные с ветром, гололедно-изморозевыми отложениями и грозами, которые наносят ущерб. Причем наибольшее число неблагоприятных явлений связано именно с ветром. Определенной тенденции к увеличению числа случаев с этими явлениями не существует, однако для бесперебойной эксплуатации ЛЭП необходим постоянный

контроль за возникающими метеорологическими нагрузками вдоль высоковольтных линий, а также необходимо уточнять климатические параметры в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных последних лет по репрезентативным метеостанциям.

Центральный федеральный округ. Ведущая роль в производстве электроэнергии в ЦФО принадлежит тепловым электростанциям (71 %). Наиболее крупными из них являются Костромская, Рязанская и Конаковская ГРЭС. На долю АЭС приходится 25,6 % в структуре мощности электростанций округа. Атомная энергетика ЦФО является самой мощной в энергосистеме России и включает 5 АЭС (Курская, Смоленская, Калининская, Нововоронежская, Нововоронежская-2). Изменение климата оказывает значительное влияние на безопасное и эффективное функционирование АЭС и ТЭС. Наиболее уязвимыми к изменению температурно-влажностного режима оказываются системы охлаждения энергоблоков электростанций. Увеличение интенсивности, продолжительности и повторяемости волн тепла и периодов без осадков может привести к уменьшению выработки электроэнергии и даже остановке энергоблоков, как это произошло на ряде АЭС летом 2010 г., когда температура наиболее жаркой пятидневки превысила базовые значения 1961–1990 гг. на 5–10 °С. При этом температура охлаждающей воды достигала 38–40 °С. Наибольшие климатические риски для работы ТЭС и АЭС характерны для юга ЦФО, в частности для Курской и Воронежской областей. Средняя продолжительность самой длинной в году волны тепла в этом районе за последние 60 лет изменилась от 5–7 до 10–12 дней, годовое число волн тепла в теплый период года также значительно возросло (Тюсов и др., 2017).

В связи с изменением температурно-влажностного режима на территории округа возрастет вероятность высокой пожароопасности и смерчей, представляющих значительную угрозу для агрегатов электростанций и ЛЭП, осуществляющих внешнее электроснабжение станций. Прогнозные оценки (Катцов и др., 2022) показывают, что к середине XXI в. ожидается усиление указанных тенденций (рис. 43 г, е).

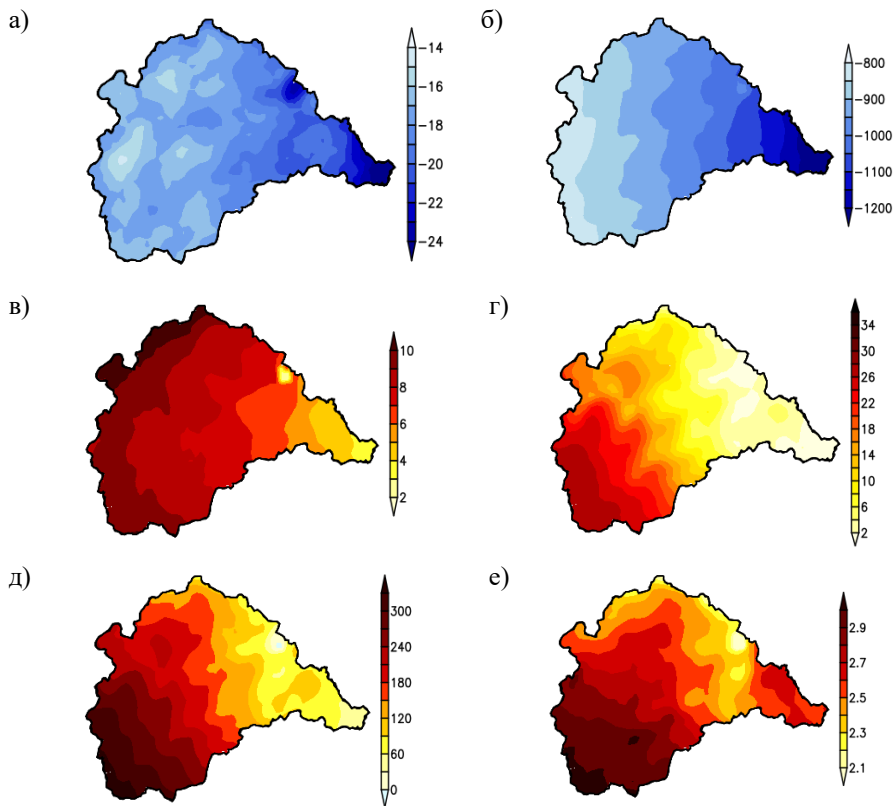


Рис. 43. ЦФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) продолжительность отопительного периода, дни; б) градусо-сутки отопительного периода, °С·сут.; в) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С, дни; г) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше +30 °С, дни; д) дефицит холода, °С·сут.; е) температура наиболее жаркой 30-дневки, °С. Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Учитывая высокую степень износа объектов электроэнергетики ЦФО, для их адаптации к изменению и изменчивости климата особое значение приобретают обновление или модернизация этих объектов: улучшение рабочих характеристик теплообменников и систем охлаждения, установка кондиционеров и дополнительных охлаждающих модулей в системы вентиляции, а также резервных систем охлаждения, работающих на дизельном топливе, и т. д. (Дорохова, 2019).

В ЦФО возобновляемые источники энергии не являются важной составляющей энергетического комплекса. Доля альтернативной энергетики в объеме производимого электричества составляет 0,066 % (Двинин, 2019). По данным (Атаев, 2016), экономический потенциал возобновляемых ресурсов в округе имеет достаточно высокие показатели. Ресурсы солнечной энергии оцениваются в 2,61 млрд кВт·ч (ежегодного возобновления), ветровые ресурсы — 1,4 млрд, ресурсы биомассы — 23,1 млрд, геотермальные ресурсы — 1,5 млрд кВт·ч.

Природный солнечный потенциал ЦФО, характеризующийся продолжительностью солнечного сияния за год и суммарным годовым приходом солнечной радиации на земную поверхность, составляет в северных областях 1700–1800 ч и 1050–1080 кВт·ч/м² соответственно, в южных районах продолжительность солнечного сияния возрастает до 1900–2000 ч, а годовой приход суммарной радиации — до 1100–1150 кВт·ч/м².

Ветровой потенциал территории ЦФО также не является очень высоким. Преобладающие средние годовые скорости ветра находятся в пределах 2,7–3,9 м/с. Вероятность энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с) — 35–45 %, в отдельных районах до 60 %. Несмотря на невысокие ветровые ресурсы в ЦФО введены в эксплуатацию 5 ветрогенераторов. Мощность каждого объекта составляет 0,1 МВт.

Энергосистема ЦФО является самой крупной в России и входит в зону централизованного энергоснабжения Российской Федерации. Согласно (СП «Нагрузки и воздействия», 2016), территория ЦФО в основном относится ко II гололедному району (за исключением Смоленской, Брянской и Воронежской областей, которые относятся

к III району). Однако даже незначительные гололедные отложения совместно с ветром могут создавать нагрузку, приводящую к отключению электроэнергии. На территории округа нередко наблюдаются ледяные дожди, которые создают дополнительную нагрузку на провода ВЛ и приводят к серьезным авариям. Например, в декабре 2010 г. ледяной дождь, выпавший в Москве, Московской области и ряде соседних областей, привел к массовым отключениям электроэнергии. В Московской, Владимирской, Тверской, Смоленской областях длительное время оставались без электроэнергии около 400 тыс. человек.

Ежегодно во всем ЦФО наблюдаются явления, связанные с ветром, гололедно-изморозевыми отложениями и грозами, которые наносят ущерб. Определенной тенденции к увеличению числа случаев с этими явлениями не наблюдается, однако для бесперебойной эксплуатации ЛЭП необходимы постоянный контроль за возникающими метеорологическими нагрузками вдоль высоковольтных линий и уточнение климатических параметров в районах эксплуатации и проектирования новых ЛЭП с учетом данных наблюдений последних лет по репрезентативным метеостанциям.

Южный федеральный округ. Энергетический комплекс ЮФО представлен несколькими видами генерации, среди которых преобладают тепловые электростанции (около 60 %). Самыми крупными из них являются Новочеркасская ГРЭС (Ростовская область) и Краснодарская ТЭЦ (Краснодарский край). Наряду с тепловыми станциями в округе энергию также генерируют ГЭС (29,6 % в структуре установленной мощности электростанций региона). Самой мощной из них является Волжская ГЭС (Волгоградская обл.), которая входит в Волжско-Камский каскад и является крупнейшей на Волге и на всей территории ЕТР. Атомная энергетика представлена Ростовской АЭС. На ее долю приходится около 10 % генерации электроэнергии в структуре регионального энергетического комплекса. Все указанные источники энергии являются уязвимыми к изменению климата. Эффективность

и безопасность работы тепловых и атомных электростанций напрямую зависит от температуры наружного воздуха и доступности воды для охлаждения энергоблоков. По данным наблюдений во 2-й половине XX – начале XXI в. на юге ЕТР заметно возросла интенсивность, повторяемость и длительность тепловых волн, а также число дней с температурой воздуха выше 30 °С (рис. 44), что обуславливает значительные погодно-климатические риски для энергетического комплекса ЮФО.

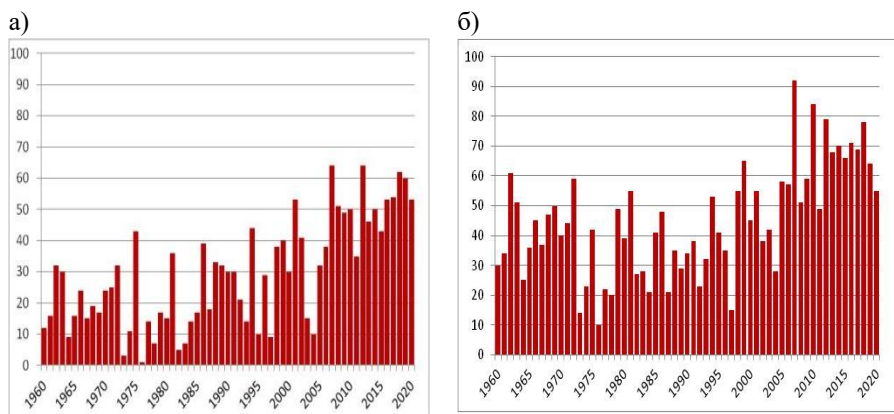


Рис. 44. Число дней с температурой воздуха выше 30 °С, 1960–2020 гг.: а) Симферополь; б) Краснодар

Результаты сценарного прогнозирования характеристик температурно-влажностного режима говорят о том, что в дальнейшем вероятно усиление наблюдаемых тенденций (рис. 39б, г, ж, з). Продолжительность наиболее длинной волны тепла на территории округа к середине XXI в. может возрасти на 10–12 дней, а периоды с аномально высокими температурами в этом районе будут наблюдаться 2–3 раза в год (Shkolnik et al., 2018; Тюсов и др., 2017).

Такая тенденция может стать фактором, ограничивающим мощности ТЭС и АЭС. Кроме того, рост температуры воздуха повышает риск нехватки водных ресурсов как из-за увеличивающегося испарения с поверхности прудов-охладителей, так

и в связи с возрастающим потреблением воды в сельском хозяйстве. В этих условиях оптимальным решением проблем энергодефицита ЮФО является развитие альтернативной энергетики, максимальная экономия всех видов энергетических и водных ресурсов, а также интенсивное внедрение энергосберегающих технологий.

Увеличение производства энергии на ТЭС и АЭС в связи с ростом ее потребления приводит к росту выбросов загрязняющих веществ в ЮФО. При этом ЮФО имеет экономический потенциал по всем видам ВИЭ: солнечная, ветровая, геотермальная энергия, гидроэнергия малых рек и водотоков, а также запасы биомассы и местных видов топлива.

Наибольшим потенциалом обладает солнечная энергия — продолжительность солнечного сияния в ЮФО выше 2000 ч в год, солнечных дней в году в среднем по региону около 290, а в Астраханской области, на Ставрополье, в Калмыкии — более 300. Количество суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность в течение года, 1200–1400 кВт·ч/м². Валовый потенциал солнечной энергии региона составляет 800 трлн, технический — 82 трлн кВт·ч/год.

На 1 июня 2020 г. ЮФО являлся лидером среди регионов по вводу солнечных электрических станций. Общая установленная мощность введенных СЭС составляла 642 МВт. Здесь была запущена самая крупная фотоэлектрическая установка — СЭС «Перово» (Республика Крым), установленная мощность которой составляет более 105 МВт. В 2020 г. была введена в действие еще одна крупная СЭС — Старомарьевская (100 МВт) в Ставропольском крае. Всего на территории округа действует 15 СЭС с установленной мощностью от 5 до 105 МВт.

Наиболее благоприятным регионом ЮФО с точки зрения установки солнечных электростанций является Астраханская область, где в настоящее время действуют 5 СЭС, две из них имеют установленную мощность 60 и 75 МВт.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование солнечной энергии для теплоснабжения. Солнечные водонагревательные установки имеют наименьшие сроки

окупаемости, они технически несложны и обеспечивают хорошие экологические показатели. Удельная выработка тепловой энергии за теплый сезон в ЮФО составляет 830–950 кВт·ч/м². Коэффициент замещения нагрузки горячего водоснабжения за счет энергии солнца достигает 70–75 % (Климатические факторы..., 2010). В Краснодарском крае работает более 50 гелиоустановок горячего водоснабжения с общей площадью солнечных коллекторов более 6400 м².

Согласно оценкам будущего климата (ОД2, 2014), прогнозируемое в ЮФО увеличение прихода суммарной солнечной радиации на 2–4 % и рост температуры положительно скажется на работе солнечных коллекторов. Удельная выработка тепловой энергии увеличится на 50–60 кВт·ч с каждого квадратного метра установки.

Ветровая энергетика является также перспективным сектором в регионе ЮФО. Технический потенциал ветровой энергии по данным «Ростовэнергопроекта» около 400 тыс. МВт. Установленная мощность ВЭС в объединенной энергосистеме Юга 92,41 МВт (0,43 % от общего количества). Установка ветровых турбин максимально эффективна на побережьях Азовского и Каспийского морей, в Ставрополье, на юге Керченского полуострова, в Калмыкии, а также в зоне междуречья Дона и Волги. В этих районах средние годовые скорости ветра около 4 м/с (в Калмыкии 5,1 м/с), и, что очень важно, они отличаются большой устойчивостью от года к году (коэффициент вариации 15–25 %). Повторяемость энергоактивных скоростей (от 4 до 15 м/с), при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, составляет 55 %, в Калмыкии — более 75 %. Согласно модельным расчетам, существенные изменения приземной скорости ветра в 1-й половине XXI в. не прогнозируются (ОД2, 2014).

В настоящее время в ЮФО действует 10 ВЭС, две из них достаточно крупные: Кочубейская (Ставропольский край, 210 МВт) и Адыгейская (150 МВт), остальные мелкие, причем 7 из них в Крыму. На стадии проектирования и строительства находится еще 9 ВЭС.

Энергосистема Южного федерального округа является одной из самых старых в России, поэтому общий износ электросетевого оборудования достаточно высокий. Ежегодно в осенне-зимний и летний периоды фиксируются максимумы энергопотребления, что

может приводить к отключениям электроэнергии. ЮФО из-за своего географического расположения и климатических условий подвержен частым перебоям в электроснабжении. Трассы линий электропередач проходят в сложном рельефе, а резкие перепады температур в зимний период и сильные ветры создают экстремальные нагрузки на провода. В летний туристический период нагрузка на энергосистему многократно увеличивается из-за высоких температур воздуха, что приводит к аварийным отключениям электричества. Наибольший ущерб ЛЭП наносят ветровые нагрузки, повторяемость которых увеличивается. По гололедным нагрузкам территория округа относится к III, IV и V (особо опасному) гололедным районам. Экстремальные значения веса гололедных отложений на проводах воздушных линий могут достигать 4 кг. Тенденции к увеличению или уменьшению гололедных нагрузок не отмечается, однако растет повторяемость числа дней с гололедно-изморозевыми образованиями.

Согласно модельным оценкам, увеличится число переходов среднесуточной температуры через 0 °С на ЕТР, в том числе и в ЮФО, что приведет к увеличению повторяемости числа дней с гололедными образованиями и отложениями мокрого снега. Тенденция к увеличению повторяемости гололедных образований и сильных ветров в ЮФО может способствовать увеличению повторяемости занормативных нагрузок, которые в свою очередь могут приводить к серьезным авариям на ЛЭП.

2.4 Жилищно-коммунальное хозяйство. Строительство

Дальневосточный федеральный округ. Современные и будущие изменения климата оказывают существенное воздействие на функционирование в регионе коммунальной энергетики, занимающей центральное место в системе жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). В зимний сезон на территории ДФО ожидается значительное повышение средней температуры отопительного периода. Наибольшие изменения, достигающие к середине XXI в. 5 °С, ожидаются на прибрежных территориях арктических морей (рис. 26в). При этом относительные изменения величины градусо-суток отопительного периода варьируют на территории ДФО

в пределах 10–20 %, достигая максимальных значений в северо-восточной части ФО (рис. 26г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления в холодный период года.

В то же время в летний сезон в южных районах ДФО (в Приморском крае, на юге Хабаровского края, в Еврейской а. обл. и Амурской обл.) ожидается значимое увеличение такого показателя как дефицит холода (рис. 26е), свидетельствующее о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. На фоне сравнительно слабого увеличения дефицита тепла ожидаются периоды пиковой нагрузки на энергосистемы, связанные с длительными периодами экстремально-высоких температур (рис. 26д).

В зимний сезон в южных районах ФО (в Бурятии, Забайкальском крае, Амурской области, Приморье и на юге Хабаровского и Камчатского краев) уже в настоящее время наблюдается неблагоприятная тенденция к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, которая приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Изменение режима атмосферных осадков на территории ДФО негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 25а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов в холодный сезон будет также оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Рост экстремальности осадков на территории ДФО будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков

(рис. 25 в, г). Такие изменения могут привести к проблемам с водообеспечением, что потребует разработки адаптационных мер.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 26а) и увеличение продолжительности теплого сезона создаст более благоприятные условия для проведения работ и уменьшит время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 26б, д). Особое внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

Приволжский федеральный округ. Центральное место в системе ЖКХ ПФО занимает коммунальная энергетика, обеспечивающая функционирование систем теплоснабжения и электроснабжения во все сезоны года. К середине XXI в. величина градусо-суток отопительного периода, являющаяся индексом теплопотребления, уменьшится в регионе на 1000–1600 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$ (в наибольшей степени — на северо-востоке ФО, в Пермском крае) (рис. 27е). Такие изменения могут привести к потенциальному уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года более чем на 15 % по отношению к базовым значениям конца XX в. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфорта жилых зданий

и препятствующими энергосбережению. При отсутствии модернизации сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов.

В летний сезон ожидается значимое увеличение числа жарких дней (рис. 27г) и такого показателя как дефицит холода (рис. 27в), являющегося индексом энергопотребления в летний сезон и свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. Наибольшее увеличение дефицита холода ожидается в Саратовской области (300 °С·сут. и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, наиболее выраженной на юго-западе ПФО: в Саратовской и Оренбургской областях (рис. 27б). Эта тенденция приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение количества зимних осадков, в особенности выпадающих в период оттепелей.

Изменение режима атмосферных осадков на территории ПФО негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 28 а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на работу городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. Рост экстремальности осадков будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 28 в, г), что может привести к проблемам с водообеспечением.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой

воздуха (в наибольшей степени — на северо-востоке ФО, в Пермском крае) приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ (рис. 27а). Однако рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с продолжительностью экстремально-высоких температур (рис. 27д).

Северо-Западный федеральный округ. Происходящие и ожидаемые изменения климата оказывают существенное воздействие на функционирование в регионе коммунальной энергетики, занимающей центральное место в системе ЖКХ. На востоке СЗФО (в Ненецком а.окр. и в Республике Коми) уже в настоящее время отмечается наибольшая для территории РФ скорость уменьшения продолжительности отопительного периода (до 5 сут./10 лет). К середине XXI в. ожидаемое уменьшение этой величины (по сравнению с концом XX в.) составит около 40 дней (рис. 29в) и может способствовать уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий. В наибольшей степени это характерно для западных районов СЗФО. Для извлечения потенциальных выгод необходимо внедрение современных технологий производства энергии и модернизация систем теплоснабжения.

В последние десятилетия на западе СЗФО наблюдается выраженная тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий. Это обусловлено

повышением температуры зимнего сезона и ростом числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 29г). К середине XXI в. ожидаемое увеличение числа таких дней в Ленинградской, Псковской и Новгородской областях составит, согласно сценарию RCP8.5, 10–12 дней. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Рост суточных экстремумов осадков (рис. 30а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, приведет к проблемам с водоотведением. Уже в настоящее время в Санкт-Петербурге становится актуальной модернизация системы водоотведения на основе использования новых нормативных значений интенсивности осадков. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции в холодный сезон будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже –30 °С и уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха (рис. 29а, б) приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных

нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 29д, е).

Северо-Кавказский федеральный округ. Изменение климата оказывает преимущественно отрицательное воздействие на функционирование в регионе ЖКХ, определяющего условия жизни людей (комфортности жилища, его инженерного благоустройства, качества и надежности услуг транспорта, бытовых и других услуг). При современных темпах потепления существующий уровень инженерного обеспечения зданий не в полной мере обеспечивает необходимый уровень комфортности жилища и среды обитания в целом. По данным наблюдений, частота появления в 1991–2020 гг. значений годового максимума температуры, превышающих 90-й перцентиль для периода 1961–1990 гг., увеличилась примерно в 2,5 раза на всей территории округа. Число дней с максимальной температурой воздуха выше +30 °С в Ставропольском крае в 1961–2020 гг. увеличивается со скоростью более 5 дн./10 лет (Хлебникова и др., 2021). К середине XXI в. увеличение числа таких жарких дней (рис. 32б) составит на равнинной территории ФО около 25 суток. При этом вырастет такой показатель как дефицит холода (рис. 32в), который можно рассматривать как индекс потенциального энергопотребления в теплый сезон. Наибольшее увеличение этого показателя, свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования, ожидается на территории Ставропольского края (достигнет величины 350 °С·сут.).

На территории Ставропольского края и в Карачаево-Черкессии ожидается увеличение суточных экстремумов осадков как в холодный, так и в теплый сезоны (рис. 32д, е). Рост суточных экстремумов осадков, сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением и затоплением инфраструктуры. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на работу транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения строительных работ. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ (рис. 32а). Однако рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на их стоимости.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с продолжительностью экстремально-высоких температур (рис. 32г).

Сибирский федеральный округ. Современные изменения термического режима на территории СФО оказывают значительное влияние на условия функционирования ЖКХ. На протяжении XXI в. ожидается усиление наблюдаемых тенденций. Повышение средней температуры отопительного периода к середине XXI в. составит около 5 °С на Таймыре и около 2 °С — в южных областях ФО (рис. 41в). Ожидаемое относительное изменение величины градусо-суток отопительного периода увеличивается с востока на запад, составляя около 10 % вблизи границы с Якутией и достигая 15–18 % в западных районах Красноярского края и южных густонаселенных областях ФО (рис. 41г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления на региональном уровне в холодный период года. В то же время в южных районах СФО в зимний сезон ожидается рост числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 5ж), который в сочетании с увеличением количества зимних осадков может привести к ускоренному старению зданий и потребовать повышения затрат на их эксплуатацию.

В летний сезон на территории Иркутской области ожидается значимое увеличение такого показателя как дефицит холода (рис. 41з),

свидетельствующее о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. На фоне сравнительно слабого увеличения дефицита тепла ожидаются периоды пиковой нагрузки на энергосистемы, связанные с волнами тепла (рис. 41е).

На всей территории СФО ожидается увеличение количества атмосферных осадков в теплый и холодный периоды (рис. 34а, б). Это сопровождается изменением режима выпадения осадков, которое проявляется как в увеличении интенсивности осадков, так и в изменении продолжительности периодов без осадков. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 34в, г), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции в холодный сезон (рис. 34в, д) будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. В то же время, увеличение продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 34ж, з), ожидаемое в республиках Тува, Алтай и Иркутской области, может привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 41б) и увеличение продолжительности теплого сезона (рис. 41а) создаст более благоприятные условия для проведения работ и уменьшит время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям.

В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 41д, е). Особое внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

Уральский федеральный округ. Изменения климата оказывают значительное влияние на условия функционирования ЖКХ в УФО. В зимний сезон на территории ФО ожидается существенное повышение средней температуры отопительного периода, которое к середине XXI в. на севере ЯНАО составит около 5 °С (рис. 45в). При этом величина градусо-суток отопительного периода на территории ЯНАО и ХМАО уменьшится на 15–18 % по отношению к концу XX в. (рис. 45г). Такие изменения создают предпосылки для уменьшения энергопотребления в холодный период года и делают актуальным проведение адекватной технологической модернизации систем теплоснабжения.

В то же время в южных районах УФО (Челябинской, Курганской, Свердловской и Тюменской областях) в зимний сезон ожидается усиление негативной тенденции, которая проявляется в ускоренном старении и уменьшении долговечности ограждающих конструкций зданий, обусловленном повышением температуры зимнего сезона и ростом числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (рис. 45б). Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества зимних осадков и, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели.

Изменение режима атмосферных осадков на территории ФО негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 36а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов, а также сумм осадков различного периода аккумуляции в холодный сезон (рис. 36 б, в), будет оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет

к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды.

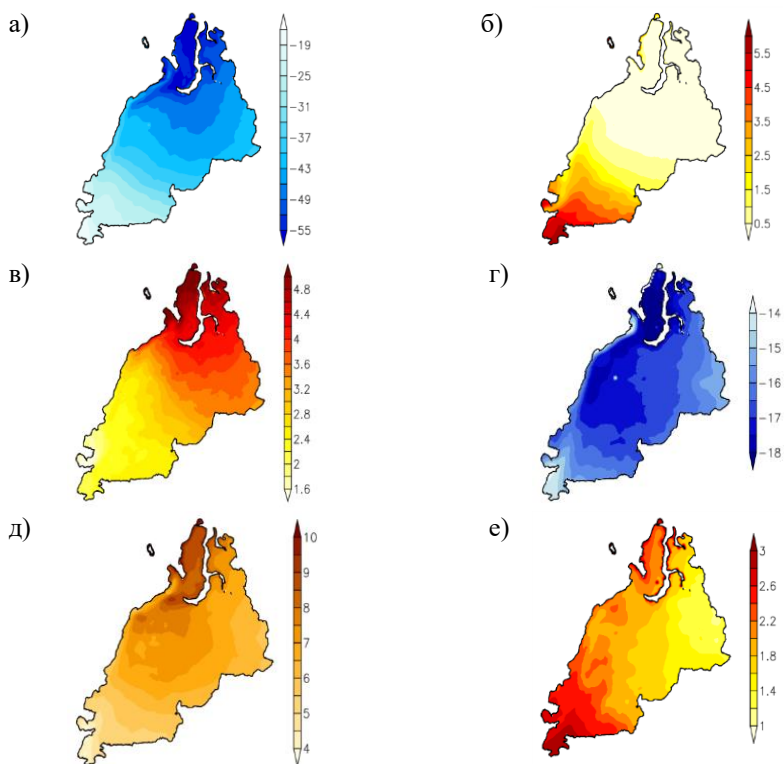


Рис. 45. УФО. Изменение специализированных показателей термического режима в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999: а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже -30°C , дни; б) число дней с переходом температуры воздуха через 0°C , дни; в) средняя температура отопительного периода, $^{\circ}\text{C}$; г) градусо-сутки отопительного периода, %; д) температура наиболее холодной пятидневки, $^{\circ}\text{C}$; е) температура наиболее жаркой 30-дневки, $^{\circ}\text{C}$.
Оценки по ансамблю региональной климатической модели ФГБУ «ГГО». Сценарий RCP8.5 МГЭИК

Рост экстремальности осадков на территории УФО будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 36 в, г). Такие изменения в южных районах УФО могут привести к проблеме с водообеспечением и потребовать разработки адаптационных мер.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима в целом положительно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 45а) и увеличение продолжительности теплого сезона создаст более благоприятные условия для проведения работ и уменьшит время реализации проектов. Вместе с тем, рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно повлияет на стоимость строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений, управления стабилизацией откосов и пр.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий (рис. 45 д, е). Особое внимание должно быть уделено исследованию эволюции многолетнемерзлых грунтов и анализу геокриологических рисков в регионе.

Центральный федеральный округ. Изменение климата оказывает неоднозначное воздействие на функционирование ЖКХ в регионе. В силу высокой плотности населения на территории ФО эти изменения имеют серьезные экономические последствия. Центральное место в системе ЖКХ занимает коммунальная энергетика, обеспечивающая функционирование систем теплоснабжения и электроснабжения во все сезоны года. Уже в настоящее время величина градусо-суток отопительного периода (ГСОП), являющаяся индексом теплопотребления, уменьшается

в регионе со скоростью 100–150 °С·сут./10 лет. К середине XXI в. продолжительность отопительного периода сократится на 15–20 дней и более (рис. 43а). Величина ГСОП (рис. 43б) уменьшится на 800–1200 °С·сут. (в наибольшей степени — на востоке ФО, в Костромской области). Такие изменения могут привести к потенциальному уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года более чем на 15 % по отношению к базовым значениям конца XX в. Однако в настоящее время в силу недостаточной технологической развитости процесс потепления сопровождается массовыми «перетопами» и «недотопами», снижающими уровень комфортности жилых зданий и препятствующими энергосбережению. При отсутствии модернизации сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов.

В летний сезон ожидается значимое увеличение числа жарких дней (рис. 43г) и такого показателя как дефицит холода (рис. 43д), являющегося индексом энергопотребления в летний сезон и свидетельствующего о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования. Наибольшее увеличение дефицита холода ожидается в Белгородской и Воронежской областях (300 °С·сут. и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С, наиболее выраженной в западных районах ЦФО (рис. 43в). Эта тенденция приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение количества зимних осадков, в особенности выпадающих в период оттепелей.

Изменение режима атмосферных осадков на территории ЦФО негативно отразится на функционировании городского хозяйства. Рост суточных экстремумов осадков (рис. 38а, б), сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением. Увеличение суточных экстремумов будет также

оказывать неблагоприятное воздействие на функционирование городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. Рост экстремальности осадков будет проявляться не только в увеличении их интенсивности, но и в изменении продолжительности периодов с дефицитом осадков (рис. 38в, г), что может привести к проблемам с водообеспечением.

Происходящие и ожидаемые изменения климата неоднозначно повлияют на условия проведения работ в строительном секторе. Уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха приведет к увеличению продолжительности строительного сезона и создаст более благоприятные условия для проведения работ. Однако рост интенсивности и частоты экстремальных осадков негативно отразится на стоимости строительных работ.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям. В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с продолжительностью экстремально-высоких температур (рис. 43е).

Южный федеральный округ. Изменение климата оказывает преимущественно отрицательное воздействие на функционирование в регионе ЖКХ, определяющего условия жизни людей (комфортности жилища, его инженерного благоустройства, качества и надежности услуг транспорта, бытовых и других услуг). При современных темпах потепления существующий уровень инженерного обслуживания зданий не в полной мере обеспечивает необходимый уровень комфортности жилища и среды обитания в целом. В настоящее время число дней с максимальной температурой воздуха выше +30 °С увеличивается со скоростью 4–5 дней/10 лет на всей территории ЮФО (Хлебникова и др., 2021). К середине XXI в. ожидается увеличение числа таких жарких дней (рис. 39г) до 30 суток и более

на территории всех субъектов ФО. При этом вырастет такой показатель как дефицит холода (рис. 39в), который можно рассматривать как индекс потенциального энергопотребления в теплый сезон. Наибольшее увеличение этого показателя, свидетельствующего

о перегреве зданий и ухудшении комфортности жилища при отсутствии кондиционирования, ожидается в Астраханской области и Республике Калмыкия (до 400 °С·сут. и более).

В зимний сезон ожидается усиление неблагоприятной тенденции к увеличению числа дней с внутрисуточным переходом температуры через 0 °С на территории Ростовской, Астраханской и Волгоградской областей, а также в республике Калмыкия (рис. 39а). Эта тенденция, в сочетании с увеличением количества осадков в периоды оттепелей, приводит к ускоренному старению ограждающих конструкций зданий и росту эксплуатационных расходов на их содержание.

Изменение режима атмосферных осадков на территории ЮФО негативно отразится на функционировании городского хозяйства. В холодный сезон рост суточных экстремумов осадков ожидается на всей территории ФО (рис. 39д), в теплый сезон — на территории Краснодарского края и Адыгеи (рис. 39е). Рост суточных экстремумов осадков, сочетающийся с увеличением их интенсивности, может привести к проблемам с водоотведением и затоплением инфраструктуры. Увеличение суточных экстремумов будет также оказывать неблагоприятное воздействие на работу городского транспорта и приведет к существенным дополнительным затратам на поддержание нормальных условий городской среды. На территории Ростовской, Волгоградской и Астраханской областей, а также в Республике Калмыкия в теплый сезон ожидается увеличение длительности периодов с дефицитом осадков (рис. 39 ж, з), что в сочетании с продолжительными периодами экстремально высоких температур (рис. 39г) может вызвать проблемы с водоснабжением.

В контексте обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, особого внимания требует оценка рисков, обусловленных несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям.

В первую очередь это относится к анализу возможных атмосферных нагрузок (снеговых, ветровых, гололедных), а также критических температурных воздействий, связанных с продолжительностью экстремально-высоких температур.

2.5 Сельское хозяйство

Дальневосточный федеральный округ. Последствия изменения климата в ДФО связаны с ростом термических ресурсов. Ожидается потепление во все сезоны года (оценки тенденций повышения температуры воздуха составляют от 0,3 до 0,5 °С за 10 лет), а также увеличение среднего количества осадков зимой и весной. Количество летних осадков за последние 10 лет понизилось только в Республике Бурятия и Забайкальском крае — от 15 до 20 % относительно 1961–1990 гг. Наблюдаемый повсеместно рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, а также увеличение продолжительности вегетационного периода являются положительным фактором развития сельского хозяйства региона. Увеличение повторяемости засушливых явлений в ряде районов не ведет к снижению продуктивности аграрного производства благодаря высокой исходной увлажненности территории. Наблюдаемые изменения агрометеорологических условий территории региона

в целом способствуют росту урожайности сельскохозяйственных культур. Возможно увеличение площадей озимых культур благодаря улучшению условий перезимовки, а также расширение посевов риса и сои в связи с ростом тепловых ресурсов. Повышение интенсификации производства (использование удобрений, химических средств защиты растений, семенного материала высоких репродукций) — также один из эффективных путей адаптации к изменениям климата в регионе.

В последние годы на Дальнем Востоке наблюдается увеличение ущерба сельскохозяйственным растениям от возрастания роли нестадных саранчовых вредителей. Особенно уязвимы Республики Бурятия и Саха-Якутия, Забайкальский край, Амурская область. При дальнейшем увеличении теплообеспеченности и засушливости

региона роль нестадных саранчовых вредителей может возрасти в еще большей степени, что необходимо учитывать при планировании агротехнических и мониторинговых мероприятий. В Приморском крае и Амурской области может активизироваться распространение колорадского жука за счет увеличения количества его генераций и проникновение этого вредителя в более северные районы о. Сахалин и Хабаровского края. Наблюдается также усиление опасного дальневосточного вредителя картофеля и других овощных культур — картофельной коровки или эпиляхны (*Epilachna vigintioctomaculata* Motsch.), которая наносит существенный вред картофелеводству Приморского края, южных частей Хабаровского края, Амурской области и о. Сахалин. Отмечается тенденция расширения ареала в более северные регионы. Требуется своевременные обработки инсектицидами, использование устойчивых сортов и соблюдение севооборотов.

Приволжский федеральный округ. Поволжье — самая засушливая территория земледельческой зоны России, зона рискованного земледелия, на которую приходится около 22 % валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом. В последние десятилетия повсеместно наблюдается рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур в теплый период года и в период перезимовки. Рост зимних температур, в том числе в январе, критическом для зимующих культур, достигает 1,0–1,2 °С за десятилетие, что свидетельствует об улучшении условий перезимовки озимой пшеницы, которая дает примерно половину валового сбора зерновых и зернобобовых в этом регионе.

Тенденция роста весенних осадков в последние десятилетия составляет 7–10 % за 10 лет. В самых засушливых областях, Оренбургской и Саратовской, в летние месяцы вегетационного периода количество осадков уменьшается (скорость изменения составляет от –10 до –15 % за 10 лет). На севере округа (Пермский край, Кировская область) значимых отклонений показателей влагообеспеченности относительно базового периода не наблюдается.

Увеличивается продолжительность периодов без осадков и повторяемость атмосферных засух на территории округа.

В 2009–2018 гг. в отдельных районах Саратовской области опасное явление «Засуха атмосферная» наблюдалось 8 раз: засух не было только в 2012 и 2013 гг. В засушливые годы в 50 % случаев в течение вегетационного периода наблюдались 2–3 засухи. Так, в 2010 г. засуха продолжалась в общей сложности 76 дней — с 30 мая по 18 августа. В 2014 г. наблюдалась весенняя засуха с мая до середины июня, а второй длительный период с засухой продолжался 1,5 месяца — с июля по август. При этом нет четко выраженной аномалии периода засух. Засухи наблюдаются во все сезоны: весенний, летний и осенний.

Меры по адаптации должны включать более широкое внедрение влагосберегающих технологий (снегозадержание, уменьшение непродуктивного испарения, ультраранние сроки сева и др.), расширение посевов засухоустойчивых культур, расширение посевов озимых культур, расширение орошаемых площадей.

Жаркая засушливая погода, благоприятные экологические условия будут способствовать размножению саранчовых вредителей. Наиболее вредоносны в этом регионе будут такие стадные виды как азиатская саранча (*Locusts migratoria migratoria* L.) и итальянский прус (*Calliptamus italicus* L.). Усилится роль и других теплолюбивых насекомых-вредителей: колорадского жука, проволочников (личинки жуков-щелкунов), жужелиц, клопа вредная черепашка. Необходим постоянный мониторинг, своевременное проведение агротехнических мероприятий, обработки инсектицидами, использование устойчивых сортов культурных растений.

Северо-Западный федеральный округ. В СЗФО наблюдается рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, увеличение продолжительности периода вегетации ($T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и увеличение сумм температур воздуха за период с температурой, превышающей $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура воздуха весенне-летнего периода растет со скоростью $0,4\text{--}0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Скорость роста температуры воздуха выше в северных областях и ниже — в южных. Скорость роста сумм температур воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет примерно $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Устойчивый переход температуры через $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ весной, наблюдаемый

по климатической норме в конце 2-й – начале 3-й декады мая в северных областях (в пределах земледельческой зоны), сдвинулся на более ранние сроки (на 4–6 дней). Увеличивается повторяемость оттепелей зимой и заморозков весной.

По условиям увлажнения регион относится к влажной зоне, и условия влагообеспеченности сельскохозяйственных культур за последние 20 лет не претерпели существенных изменений. Суммарное количество осадков в весенний период имеет тенденцию к повышению, но в летний период тренды осадков практически отсутствуют. Территория региона достаточно хорошо увлажнена, в отдельные годы наблюдается опасное природное явление «Переувлажнение почвы».

Адаптация к изменению агроклиматических условий в СЗФО связана с возросшими за период глобального потепления термическими ресурсами. В настоящее время вклад СЗФО в зерновой баланс составляет менее 1% от валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по России. Рост обеспеченности теплом и увеличение продолжительности вегетационного периода при достаточной увлажненности территории существенно расширяют возможности для развития высокоинтенсивного сельского хозяйства в этом регионе. Увеличение доз органических удобрений для улучшения питания растений и воспроизводства плодородия почв будет способствовать увеличению урожайности сельскохозяйственных культур в регионе.

При сохранении наблюдаемых темпов потепления в регионе должны улучшаться условия для животноводства в результате роста кормовой базы и сокращения периода стойлового содержания скота. Ожидается повышение продуктивности сенокосов и пастбищ, в том числе и за счет увеличения продолжительности безморозного периода.

Увеличение увлажненности территорий СЗФО на фоне повышения теплообеспеченности будет способствовать развитию различных грибных и бактериальных заболеваний сельскохозяйственных культур (фитофтороз (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary), фузариоз (*Fusarium* spp.), ржавчины, головни, различные бактериозы и гнили). Увеличение сумм эффективных температур приведет также

к усилению вредоносности колорадского жука. Рекомендуемые меры адаптации: использование сортов, устойчивых к вредителям и возбудителям болезней, соблюдение севооборота, агротехнических мероприятий, тщательное уничтожение растительных остатков после уборки урожая, обработка посадочного материала и почвы пестицидами и фунгицидами перед посевной, обработка растений в течение вегетационного периода.

Северо-Кавказский федеральный округ. На Северном Кавказе наблюдается повсеместный рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур. Темпы роста сумм температур выше 10 °С превысили в ряде районов 100 °С за 10 лет, что наряду с увеличением продолжительности вегетационного периода до 5–6 суток за 10 лет свидетельствует о возможности расширения посевов теплолюбивых культур, в том числе засухоустойчивых — кукурузы, сои, сорго.

Повторяемость засухи в регионе как опасного природного явления, приводящего к значительным потерям урожайности, за последние десятилетия составляет от 20 % в центральной степной зоне, до 65 % — в восточной сухостепной зоне.

В связи с потеплением климата может быть поставлен вопрос о дальнейшем развитии в этом регионе зоны субтропического земледелия, возобновлении возделывания хлопчатника, расширении площадей посевов сои, дальнейшем развитии виноградарства.

Меры по адаптации к изменениям климата: более широкое внедрение влагосберегающих технологий, расширение посевов засухоустойчивых культур, расширение посевов озимых культур, расширение орошаемых площадей.

Прогнозируются повторяющиеся вспышки массового размножения стадных саранчовых вредителей. Наиболее вредоносными будут виды азиатской (*Locusts migratoria migratoria* L.) и мароккской (*Dociostaurus maroccanus* Thunb.) саранчи. Увеличение сумм активных и эффективных температур приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей: лугового мотылька, различных видов зерновых совок и клещей, вредителей

плодово-ягодных культур. Необходим своевременный контроль и агротехническая обработка почвы, семенного материала и вегетативных частей сельскохозяйственных культур. Возможность возникновения частых угроз чрезвычайных ситуаций в данном регионе требует усиленного мониторинга и готовности всех агротехнических служб.

Сибирский федеральный округ. Самые заметные последствия изменений температурного режима в регионе связаны со значительным потеплением в весенний сезон (1,7–2,0 °С). Более умеренно потепление проявляется в летний сезон в центральных и южных областях (0,2–0,4 °С). Сумма активных температур за период активной вегетации сельскохозяйственных культур повышается. Скорость роста этого показателя составляет от 40 до 70 °С за 10 лет. Наблюдается рост продолжительности периода вегетации, не превышающий 2–3 суток за 10 лет.

В весенне-летний период наблюдается положительная тенденция к увеличению количества осадков. В некоторых областях за период 2005–2016 гг. сумма осадков за весенний период увеличилась на 15–20 % по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг. При наблюдаемом росте зимних осадков можно ожидать увеличения накопленной за зиму массы снега и ускорения ее таяния весной.

Посевные площади зерновых культур в СФО составляют более 20 % площадей по России в целом. В результате изменения агроклиматических ресурсов колебания климатически обусловленной урожайности зерновых культур за последние десятилетия не были значительными и не превышали 5–10 %.

В основных зерновых регионах не выявлено значимого понижения урожайности, связанного с долговременными изменениями температурного и влажностного режимов. Напротив, в отдельных районах Новосибирской и Челябинской областей и в Алтайском крае климатически обусловленная урожайность повысилась за период потепления.

Потепление климата, которое в Западной и Восточной Сибири не сопровождается ростом засушливости, создает благоприятные

условия для развития сельского хозяйства и ведет к повышению его продуктивности за счет более широкого внедрения позднеспелых культур, сортов и гибридов. Потепление климата может способствовать укреплению кормовой базы животноводства за счет многоукосных трав и пожнивных посевов. Как меру адаптации к изменению климата следует рассматривать расширение посевов озимых культур (пшеницы) в степных районах Сибири.

На территории СФО в последние годы регистрируется повышенная численность нестадных саранчовых вредителей, преимущественно в республике Хакасия. В Новосибирской и Омской областях отмечены очаги размножения итальянского пруса, который при благоприятных погодных условиях может проникнуть и в другие области округа. Отмечается присутствие саранчовых также в Кемеровской и Иркутской областях, в Красноярском и Алтайском краях, Республиках Тыва и Алтай. Из-за увеличения суммы эффективных температур возможно продвижение колорадского жука в более северные регионы и увеличение количества его генераций в южной части округа. В СФО также зафиксирован высокий рост численности и увеличение площади заселения лугового мотылька, в отдельных регионах СФО наблюдалось массовое появление капустной моли на посевах рапса. В качестве защитных и адаптационных мер рекомендуются обработки инсектицидами, постоянный мониторинг и своевременное проведение агротехнических мероприятий.

Уральский федеральный округ. В регионе наблюдается тенденция к значительному потеплению в северных областях, более сильному в весенний и осенний период (1,3–1,5 °С), чем в летний (0,4–0,5 °С). Сумма температур за период активной вегетации и за весь теплый период года увеличилась менее чем на 200 °С повсеместно.

Степень увлажненности территории, оцениваемая индексом сухости за весь сельскохозяйственный год в целом, заметно не изменилась за последние десятилетия. Влагообеспеченность зерновых культур увеличилась, особенно в весенний период вегетации (от 10 до 25 % относительно базового периода). Менее благоприятные

условия увлажнения наблюдаются в южных районах Челябинской и Курганской областей, где снижается количество зимних и летних осадков.

На УФО в целом приходится порядка 5 % производства зерновых и зернобобовых культур в Российской Федерации. Климатически обусловленная урожайность яровых зерновых культур практически не изменилась за последние десятилетия относительно базового периода.

Адаптация к изменению климата в этом регионе может заключаться в расширении посевных площадей озимых зерновых культур (пшеницы, ржи и ячменя) как более урожайных.

Увеличение теплообеспеченности округа и усиление засушливости его южной части способствует размножению саранчовых вредителей. В Курганской, Тюменской и Челябинской областях наблюдаются очаги размножения итальянского пруса (*Calliptamus italicus* L.) и нестадных видов саранчовых. Саранчовые вредители выявляются также и в более северной Свердловской области пока в невысокой численности, однако при наблюдаемой тенденции она может возрасти до более значимых размеров. Усилится роль и других насекомых-вредителей сельского хозяйства, для которых благоприятными станут теплые и умеренно влажные условия окружающей среды. Необходим своевременный мониторинг и проведение агротехнических мероприятий.

Центральный федеральный округ. В ЦФО теплообеспеченность сельскохозяйственных культур увеличивается. Температура периода вегетации ($T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) за последние 10 лет повысилась на 0,6–1,2 $^{\circ}\text{C}$ при максимуме роста в летние месяцы (1,3–2,2 $^{\circ}\text{C}$) относительно базового периода. Сумма температур за период активной вегетации (период с температурой выше 10 $^{\circ}\text{C}$) увеличилась на ~300 $^{\circ}\text{C}$. Продолжительность периода с температурой выше 5 и 10 $^{\circ}\text{C}$ выросла примерно на 7–10 сут., а даты перехода через 5 и 10 $^{\circ}\text{C}$ весной наблюдаются ранее климатической нормы на 4–8 суток.

В ЦФО положительная тенденция к росту весенних осадков наблюдается на всей территории. Тренды летних осадков

отрицательны практически во всех областях округа, а максимальная скорость снижения отмечается в ЦЧО. Следует отметить, что тенденции к росту засушливости и в другие сезоны года также проявляются в ЦЧО. Рост засушливости территории наблюдается скорее в период вегетации яровых зерновых, чем озимых культур. С начала периода потепления ГТК Селянинова на территории региона за период май–август понизился на 15–25 %, и скорость его снижения составляет –0,07 ед. за 10 лет.

Повторяемость атмосферных засух за последние 20 лет на территории округа составляет: в северных областях (Костромская, Ярославская) — от 10 до 15 %, в центральных областях (Воронежская) — от 15 до 25 %, в южных областях — 25–30 %.

Результатом изменения агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровой пшеницы на территории южных областей ЦФО за последние 10 лет. Относительное снижение климатически обусловленной урожайности последнего десятилетия относительно базового периода в целом по округу составляет от 20 до 25 %. В нечерноземной зоне значимого снижения урожайности за последние 30 лет не наблюдается (≤ 10 %).

Адаптация к изменению агроклиматических ресурсов в ЦФО в первую очередь связана с ростом тепловых ресурсов территории. Увеличение сумм температур воздуха за период активной вегетации сельскохозяйственных культур от 200 до 300 °С и выше позволяет перейти от выращивания раннеспелых сортов пшеницы, ячменя и других зерновых к их позднеспелым сортам, более урожайным и более эффективно использующим запасы продуктивной влаги в ранневесенний период вегетации. В ЦЧО станет возможным выращивать раннеспелые сорта кукурузы на зерно и фасоль, позднеспелые сорта подсолнечника.

Рост температуры воздуха в зимний период и в январе, самом холодном месяце, снижает вероятность гибели озимых зерновых от вымерзания. Адаптация к изменению климата в регионе может быть связана с расширением посевных площадей озимых культур.

В связи с увеличением теплообеспеченности и засушливости территории ЦФО усилится влияние саранчовых вредителей, в первую очередь итальянского пруса (*Calliptamus italicus* L.), которые могут вызвать значительные потери урожая различных сельскохозяйственных растений в южных регионах округа. Жаркая и сухая погода может способствовать и возрастанию численности опасных вредителей зерновых культур — хлебной жужелицы (*Zabrus tenebrioides*) в ЦЧО. Увеличение теплообеспеченности территории приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей, таких как вредная черепашка, жуки-щелкуны, капустная белянка. Также увеличится численность и вредоносность колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata*) на картофеле, в том числе за счет увеличения числа сезонных генераций. Для адаптации необходимо проведение своевременных мониторинговых и агротехнических мероприятий, подбор устойчивых к вредителям сортов, соблюдение севооборотов.

Южный федеральный округ. В ЮФО термические ресурсы за последние 20 лет увеличились значительно: сумма температур периода активной вегетации большинства сельскохозяйственных культур увеличилась в 1998–2017 гг. на 300–320 °С по сравнению с базовым периодом. Скорости роста этого показателя и температуры календарного лета здесь самые высокие на ЕТР: более 150 °С/10 лет и 0,8 °С/10 лет соответственно. Возобновление вегетации наблюдается примерно одной декадой ранее, чем в базовый период 1961–1990 гг.

В последние десятилетия наблюдается положительная тенденция роста весенних осадков практически на всей территории округа, за исключением самых засушливых областей (Республика Крым). Отрицательные тенденции количества выпадающих летних осадков прослеживаются на всей территории округа — скорость снижения составляет от 6 до 10 % за 10 лет.

Повторяемость атмосферных засух на территории округа за последние 35 лет (1984–2018) составляет: в Краснодарском крае — 20–30 % случаев, в Ростовской области — 20–35 %, в Волгоградской — 30–40 %. В Астраханской области и Республике

Калмыкия атмосферные засухи и засушливые явления наблюдаются еще чаще — в 60–70 % (Глобальный климат..., 2021).

Так, за последние 35 лет в Краснодаре и на его прилегающих территориях отмечались практически только летние засухи, охватывающие период с июля по август, за исключением 2018 г. Самые продолжительные засухи отмечены в 2018 (73 дня), 2014 (51), 2001 (50), 2010 (48) и 2012 (48) гг., длившиеся более 1,5–2 месяцев (Глобальный климат..., 2021).

Таким образом, неблагоприятные агрометеорологические последствия засух в большей степени сказываются на сельскохозяйственных культурах, основной период вегетации которых приходится на вторую половину летнего периода: подсолнечник, сахарная свекла, соя, позднеспелые сорта кукурузы и др. Озимая пшеница, являющаяся основной зерновой культурой в этом районе, в меньшей степени подвержена засухам и засушливым явлениям, в т. ч. суховеям, которые по данным наблюдений в этом регионе чаще всего отмечаются в июле и августе.

ЮФО играет ведущую роль в производстве зерна в России (около 25 % валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом). За последние 20 лет тенденция к росту урожайности озимой пшеницы в Краснодарском крае по данным Росстата оценивается в 5–7 ц/га за 10 лет. Достигнутый уровень урожайности озимой пшеницы в этом регионе показывает, что применение новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур позволяет получать высокие урожаи и в условиях роста засушливости климата. Эти технологии включают агротехнические и агрономические мероприятия: приемы обработки почвы, внесение удобрений по научно-обоснованным нормам, подготовку семян к посеву, посев, уход за посевами, борьбу с болезнями и вредителями и др.

Использование новых засухоустойчивых сортов — один из наиболее эффективных путей адаптации зернового хозяйства к изменению климата в этом регионе. Расширение посевов засухоустойчивых культур (кукуруза, сорго и просо), а также селекция новых сортов других культур, устойчивых к засухе, смогут не только нейтрализовать отрицательные последствия изменения

агроклиматических ресурсов в регионе, но и получить выгоду в новых климатических условиях.

Повторяющиеся засухи и значительное увеличение сумм активных температур на территории ЮФО будут способствовать учащению и усилению вспышек размножения стадных саранчовых вредителей. Особенно вредоносны будут нашествия азиатской (*Locusts migratoria migratoria* L.) и мароккской (*Doclostaurus maroccanus* Thunb.) саранчи. Это явление может приводить к возникновению угрозы чрезвычайных ситуаций в этих районах, что требует усиленного контроля и готовности всех агротехнических служб. Также повышенная теплообеспеченность данного региона приведет к усилению вредоносности и других насекомых-вредителей: различных видов совок, зерновых клещей, яблоневого плодожорки и яблонного листоеда. Необходима своевременная обработка посадочного материала и вегетирующих растений инсектицидами и проведение защитных агротехнических мероприятий.

2.6 Туризм

Дальневосточный федеральный округ. На территории ДФО расположено пять туристско-рекреационных районов: Якутский (Республика Саха), Колымско-Чукотский (Магаданская область и Чукотский а. окр.), Камчатский (Камчатская обл.), Амурско-Дальневосточный (Амурская обл., Хабаровский и Приморский края) и Амурско-Дальневосточный островной (Сахалинская область и Курилы).

Уникальная природа, многочисленные исторические и культурные памятники создают все условия для развития индустрии туризма и отдыха на Дальнем Востоке. Приоритетным направлением развития туристской отрасли является, прежде всего, экологический туризм (Туристский паспорт регионов РФ), так как природа Дальнего Востока исключительно ранима и экотуризм — наиболее подходящий здесь вид путешествий. Основой для его развития являются 25 заповедников, в т. ч. 3 объекта всемирного природного наследия ЮНЕСКО — Ленские столбы, горы Центрального Сихотэ-Алиня

и вулканы Камчатки. Вторым по значимости является лечебно-рекреационное направление: лечебные грязи, минеральные и геотермальные источники создают уникальные возможности для развития лечебно-оздоровительного отдыха. В регионе, как нигде более, развиты и такие специализированные виды туризма, как охота и рыбалка в чистейших водоемах Якутии, Магаданской области, на Чукотке, на Сахалине и, конечно, в Камчатской области. В Приморье, на Сахалине и на Камчатке активно развивается круизный туризм, а удаленные от побережья регионы предлагают сплавы и рафтинг по горным и равнинным рекам. Горный рельеф и снежные зимы способствуют развитию зимнего спорта и туризма — активно развивается горнолыжный туризм. На побережье Японского моря, где песчаные и галечные пляжи в сочетании с теплым морем являются основным рекреационным ресурсом территории, складываются комфортные условия для пляжного туризма.

Сегодня туристская отрасль Дальнего Востока не в полной мере реализует свой потенциал. Доля туризма в валовом региональном продукте составляет всего 1–2 % и менее. Одной из причин низкого уровня развития туризма в регионе является суровость климата на значительной части территории округа, и это, прежде всего, ограничивает оздоровительный отдых. Неблагоприятные климатические условия не только не будут способствовать процессу лечения, но и могут вызвать отрицательные сдвиги в здоровье ослабленных людей (Григорьева, Фетисов, 2009).

Для летних видов спортивно-оздоровительного отдыха продолжительность благоприятного периода, которая определяется как период с комфортными и субкомфортными температурами, продолжается в среднем от 3 месяцев на севере Якутии, в Магаданской области и на Чукотке, до 5 и более — в Приморье и на Сахалине. Однако душная и сухая погода, погода с осадками и т. д. сокращают этот период иногда более чем на 40 % (Григорьева, Фетисов, 2009). Например, пляжный отдых на побережье Охотского моря существенно зависит от режима осадков, суммы которых в летние месяцы составляют здесь 50 % годовых, а число дней с осадками более 5 мм отмечается в среднем от 10 до 15 дней

в каждом летнем месяце. Индекс комфортности туризма распределяется бимодально и имеет максимумы в мае и сентябре, что обусловлено большим количеством осадков в летний период.

Зимние виды спорта зависят от высоты и длительности залегания устойчивого снежного покрова. Наилучшие условия для зимних видов рекреации в ДФО складываются на Камчатке, юге Сахалина, в Хабаровском крае, Еврейском а. окр. Длительный сезон с высоким уровнем снежного покрова и не слишком суровый климат создают здесь все условия для развития горнолыжной рекреации.

В целом прогноз климатических условий на середину столетия в ДФО благоприятный: смягчение суровости зимнего периода (рис. 266), положительный тренд числа дней с комфортными температурами, ожидаемое уменьшение на 10–12 % количества атмосферных осадков теплого периода к середине XXI в. в Приморье (рис. 256) и их рост в зимнее время — всё это будет дополнительным стимулом для интенсификации развития туризма в регионе.

С изменением климата для отрасли вырастут и риски. Так, в будущем возможны рост уровня пожароопасности в Забайкальском и Хабаровском краях (несет угрозу природным объектам, служащим основным ресурсом экотуризма), повышение вероятности увеличения популяции клещей, повышение повторяемости опасных явлений, таких как сильные снегопады и штормовые ветры, ограничивающие как зимние, так и водные виды рекреации.

Приволжский федеральный округ. Территория ПФО включает четыре туристских района (Гировка, 2015): Верхневолжский (Нижегородская и Кировская области, Республики Марий Эл и Чувашская), Уральский (Пермская, Свердловская, Челябинская, Оренбургская области и Республики Башкортостан и Удмуртская), Южно-Российский (Республика Мордовия) и Северное Поволжье (Самарская, Саратовская области и Республика Татарстан). Во всех субъектах ПФО в большей или меньшей степени уделяют внимание вопросам развития туристской отрасли в регионе, но лидерами являются Республики Татарстан и Башкортостан и Нижегородская область.

Ключевым для округа является круизный туризм, в частности речные круизы по Волжскому водному пути. Второе важное направление региона — развитие туризма и рекреации на базе природного потенциала Уральских гор (Пермский край, Республики Башкортостан и Удмуртская). Здесь функционируют комплексы зимних (в первую очередь, горнолыжный спорт) и летних (экстремальный сплав по горным рекам, конный спорт и туризм, ловля хариуса и форели, спелеотуризм и др.) видов активного отдыха. Основными особенностями горного климата являются пониженное парциальное давление кислорода в воздухе, повышенное содержание углекислого газа, повышенная солнечная радиация, повышенная ионизация воздуха, значительные колебания суточной температуры воздуха. Эти условия дополняются высокой чистотой, прозрачностью и свежестью воздуха, что в итоге приводит к высокому оздоравливающему и тренирующему эффектам от любой рекреационной деятельности (Зорин и др., 2001).

Важнейшим перспективным направлением является экологический туризм, так как округ располагает необходимыми природными ресурсами для его развития (14 государственных заповедников, 10 национальных парков и 3 заказника федерального значения). Большой потенциал для развития в регионах ПФО имеет сельский туризм, активное развитие которого наблюдается в Кировской, Нижегородской и Оренбургской областях (Барашов, Домов, 2020). Регионы ПФО обладают достаточными возможностями для развития санаторно-курортного туризма. Лечебно-оздоровительный отдых базируется здесь на наличии уникальных природных месторождений грязей и минеральных вод. Кратковременная внутренняя рекреация представлена разнообразными походами: пешими, автомобильными, водными, лыжными. Популярны теплоходные путешествия по рекам Вятке, Усьве, Каме. Основные районы самодеятельного туризма — Северный и Средний Урал.

Комфортный для летних типов рекреации период начинается с середины мая в южных районах и с середины июня — в северных, а заканчивается в середине сентября и августа соответственно,

составляя от 2 месяцев в Кировской области до 4 — в Саратовской. Но на юге и юго-востоке области такая продолжительность комфорта условна: здесь в летний период отмечается жаркий дискомфорт в среднем до 50 дней.

Оценка степени комфортности погодных условий на территории Приволжского федерального округа (Оборин и др., 2014) для целей лечебно-оздоровительного туризма по четырем типам погоды (весьма благоприятный, благоприятный, неблагоприятный и особо неблагоприятный) показала, что в целом за год на территории ПФО преобладает неблагоприятный тип погоды, который занимает центральную и северо-восточную часть ПФО. В юго-западной части территории климат более «благоприятный», а самая комфортная для рекреации погода наиболее часто отмечается на северо-западе территории ПФО. Лучшее время для лечебной рекреации — осенне-зимний период. Лето относится к дискомфортному сезону, повторяемость особо неблагоприятной погоды в этот сезон почти в 1,5 раза выше, чем в другие сезоны, а повторяемость весьма благоприятной погоды достигает минимального значения.

Ожидаемый рост температуры воздуха к середине XXI в. в южных областях региона негативно скажется на летней рекреации, вызвав, при условии сохранения современной тенденции, значительное увеличение числа дней с сухим дискомфортом.

Оценка ресурсов зимней рекреации показывает, что во всех областях возможно комфортное для этого времени года пребывание на открытом воздухе для зимнего отдыха (рис. 18а): в Кировской и Нижегородской областях, Республике Татарстан и в Пермском крае с точки зрения теплового комфорта — с ограничениями от 25 до 30 дней. Прогнозируемое повышение зимних температур сократит число таких дней.

Северо-Западный федеральный округ. Территория СЗФО включает пять туристских районов: Кольско-Карельский (Мурманская область и Республика Карелия), Русский Север (Архангельская, Вологодская области и Республика Коми), Ленинградский (Ленинградская область), Западный морской (Калининградская

область) и Западный континентальный (Псковская и Новгородская области). Территория обладает обширными рекреационными ресурсами, богатейшим культурным наследием и имеет благоприятные возможности для развития туристской отрасли, а разнообразие природных рекреационных ресурсов позволяет развивать все природоориентированные формы туризма (Туристский паспорт регионов РФ).

Наиболее приоритетными из климатозависимых видов туризма и рекреации в регионах СЗФО являются экологический, активно-спортивный (пешие походы, сплавы по рекам, велопоходы, катание на квадроциклах, снегоходах, лыжах) и лечебно-оздоровительный. В Мурманской области развивается арктический туризм. В зимнее время в ряде регионов значительное внимание уделяется горнолыжному виду рекреации.

В настоящее время вся территория СЗФО в зимний период находится в зоне теплового дискомфорта. К середине XXI в. ожидается, что большая часть территории будет относиться к условно неблагоприятной зоне, и только на севере Архангельской области и Ненецкого а. окр. сохранятся условия крайнего дискомфорта, формирующиеся в связи с повышением зимних температур.

В летний период практически вся территории СЗФО находится в зоне теплового комфорта и субкомфорта, что позволяет развивать здесь любые виды рекреации. Продолжительность благоприятного периода с 1981 по 2010 г. составляла от 0 на крайнем севере Архангельской до почти 8 месяцев в Калининградской областях, а к середине столетия он увеличится в среднем более чем на месяц на всей территории региона. Однако, несмотря на увеличение числа дней с тепловым комфортом (субкомфортом), необходимо учитывать, что на северо-западе России наиболее неблагоприятными для рекреационной деятельности являются переходные сезоны: осенью и в предзимье преобладает пасмурная погода с дождем и снегом, а весной таяние снега сопровождается половодьем и распутицей.

Для активных зимних видов туризма, особенно для горнолыжной рекреации, необходимо наличие снега с высотой более 20 см. На территории СЗФО благоприятные условия для развития

горнолыжной индустрии в настоящее время складываются на территориях Мурманской, Вологодской, юга Архангельской областей и в Карелии. Горнолыжные курорты Ленинградской области, расположенные на высотах до 200 м, уже сейчас испытывают влияние изменения климата. Основной негативный вклад вносит состояние снежного покрова: уменьшение числа дней с высотой снега 20 см и более, увеличение частоты и интенсивности жидких осадков зимой. В более южных областях развитие данного вида рекреации сдерживает отсутствие необходимой высоты снежного покрова, в более северных — суровые термические условия. К середине столетия наиболее благоприятные условия прогнозируются для Мурманской области — единственного региона СЗФО с положительной динамикой роста высоты снежного покрова.

В двух прибалтийских регионах СЗФО природные ресурсы позволяют развитие пляжного туризма (Ленинградская и Калининградская области). Купальный сезон здесь короткий, около 1–2 месяцев, и к середине столетия увеличится незначительно — на 15 и 20 дней соответственно. В то же время, в этих регионах, в связи с повышением температуры воздуха (рис. 19б), могут сложиться дополнительные возможности для активных водных видов туризма.

Климатическими рисками для пляжного сезона в этом регионе, согласно прогнозу (ОД2, 2014), служит развитие гипоксиейно-аноксических условий в Финском заливе Балтийского моря, в значительной степени связанных с повышением температуры воды.

Северо-Кавказский федеральный округ. Территория СКФО расположена в Южной туристской зоне и включена в три рекреационных района: Северо-Кавказский, Каспийский и Горно-Кавказский. Климат СКФО крайне неоднороден. На его небольшой территории расположено 4 климатических пояса, что связано с неоднородностью рельефа: умеренно-континентальный (северная часть Ставропольского края), умеренно-теплый (низкогорье до 800–1200 м), умеренно влажный среднегорья (1200–2000 м) и умеренно холодный высокогорья на высоте 2000–4000 м.

Огромный потенциал имеет здесь лечебно-оздоровительный туризм. В регионе Кавказские Минеральные воды есть все условия для развития рекреационной деятельности: прежде всего, уникальные природно-климатические условия. Здесь сосредоточено более 100 источников минеральной воды 18 типов. Такого разнообразия больше нет нигде в мире, а лечебные грязи Тамбуканского озера не имеют аналогов. Температурный режим летом колеблется в диапазоне 14–24 °С. Район отличается самым большим в регионе числом солнечных дней (в Кисловодске свыше 300 солнечных дней в году). Влажность воздуха в дневное время около 50 %. Дожди выпадают преимущественно в виде ливней. Разнообразие рельефа создает различия в климате курортов: в Пятигорске лето теплое, зима умеренно мягкая, в Кисловодске хорошо отдыхать в зимнее время (зимой здесь стоит ясная сухая погода), а климат Железноводска соответствует горно-лесному климату среднегорий. Регион находится в непосредственной близости от теплых морей, поэтому туристы могут сочетать лечение с поездками на пляжи Черного и Каспийского морей. Кроме того, около курортов создана сеть рекреационных водохранилищ (купание, катание на лодках).

Развиты здесь и водные виды туризма и рекреации. Горные реки с их большой скоростью течения, которые стекают со склонов Большого Кавказа (Уруп, Кубань, Егорлык и др.), служат для занятий водным слаломом и рафтингом. На побережье Каспийского моря, при решении проблем экологии и безопасности, возможно развитие индустрии пляжного туризма.

Еще одним популярным в СКФО видом рекреации является горный туризм — путешествие в горах по склонам, гребням, ледникам, через перевалы и горные потоки. Наиболее популярен горный туризм и традиционный альпинизм в Северной Осетии, Кабардино-Балкарии и Ингушетии. Существуют возможности развития экстремальных видов туризма (парапланеризма, джиппинга), а также экологического и познавательного туризма. Климат горных районов зимой способствует и развитию горнолыжного спорта: продолжительное (4–5 месяцев, в высокогорье — до 7 месяцев) залегание снежного покрова (высота 50–100 см), а также обилие

солнечных дней при безветренной погоде. Сегодня в округе работает 9 горнолыжных комплексов. Создано несколько туристско-рекреационных особых экономических зон, из них активно развиваются «Архыз» в Карачаево-Черкесии, «Эльбрус» в Кабардино-Балкарии, «Ведучи» в Чечне и «Армхи» в Ингушетии. Горный рельеф является одним из главных факторов развития оздоровительно-познавательного отдыха, пешеходного туризма и привлекает большое число экскурсантов.

Изменение климата в СКФО будет негативно влиять на индустрию туризма:

– в летние месяцы из-за роста приземной температуры воздуха (рис. 20б) в условиях недостаточного увлажнения на Северном Кавказе ожидается снижение туристской привлекательности на курортах региона Кавказских Минеральных Вод и пляжного туризма на берегах Каспийского моря в высокий туристический сезон. В высокогорных областях северного склона Большого Кавказа повышение температура вызовет увеличение скорости деградации ледников (Керимов и др., 2018) и, следовательно, увеличение продолжительности селеопасных периодов, повторяемости селей и увеличение их объемов;

– ожидаемый к середине XXI в. рост количества атмосферных осадков (до 30 %) в горных районах Кавказа в зимний период, казалось бы, должен создавать здесь благоприятные условия для развития зимнего туризма, однако это вызовет широкое распространение новых лавиноопасных участков, так как основным фактором лавинообразования является интенсивность прироста снежного покрова, а продолжительность лавиноопасного периода начинается практически с момента образования устойчивого снежного покрова и длится до его разрушения. Летний же рост осадков в юго-восточной и юго-западной частях Северного склона спровоцирует возрастание селевой опасности: для Кавказа дожди и ливни являются причиной 85 % схода селей. Практически ежегодно в результате схода лавин и селей гибнут люди;

– ожидаемое увеличение случаев стихийных бедствий также создает угрозу туристам и инфраструктуре.

Таким образом, разрушительные стихийные процессы в Приэльбрусье, в значительной степени обусловленные изменением климата, являются серьезной проблемой для рекреационного развития территории. Многие из имеющихся маршрутов и районов расположения существующих и вновь создаваемых горнотуристских комплексов находятся здесь под угрозой проявления опасных природных процессов, а некоторые уже испытали воздействие этих явлений (Разумов, 2012).

Сибирский федеральный округ. Территория СФО включает пять туристских районов: Путоранский (север Красноярского края), Прибайкальский (Иркутская область), Саянский (Красноярский край, Республики Тыва и Хакасия), Обско-Алтайский равнинный (юг Алтайского края, Курганская, Омская, Новосибирская и Томская области) и Обско-Алтайский горный (Кемеровская область и Республика Алтай).

Климатические условия севера Красноярского края крайне суровы. Дискомфорт холодного периода (средняя продолжительность числа дней с температурой ниже -25°C — от 4 до 1,5 месяцев), недостаточная обеспеченность теплом летнего периода определяют здесь редкую рекреационную сеть, но 3 заповедника (Большой Арктический, Таймырский и, в первую очередь, Путоранский) привлекают сюда любителей экстремального туризма.

Биоклимат южных районов СФО более мягкий. Самый комфортный для рекреации — Обско-Алтайский регион, особенно в среднегорье. Большая продолжительность солнечного сияния, умеренно теплое, не душное лето, продолжительное залегание снежного покрова в зимний период (4–6 месяцев), что благоприятно для лыжного спорта, — всё это создает благоприятные условия для развития лечебно-оздоровительного и спортивного туризма. Летняя рекреация широко представлена водными видами: байдарочными походами по горным рекам, парусными — на озерах и водохранилищах, круизными по Енисею, Оби, Иртышу, Байкалу. Высокогорья СФО благоприятны для альпинизма, скалолазания, спелеотуризма.

В южных регионах СФО следует сделать акцент на развитии зимнего спортивного туризма (горнолыжного), особенно в западной части Об-Алтайского и Иркутском подрайонах. В настоящее время здесь отмечается увеличение повторяемости числа дней, комфортных для этого вида рекреации (температура воздуха в дневные часы от -5 до -15 °С, высота снега более 20 см), а к середине столетия, на фоне прогнозируемого здесь роста температур и количества осадков в зимний период, можно ожидать увеличения числа таких дней.

К угрозам, сопровождающим изменение климата в регионе, следует отнести рост температуры воздуха и уменьшение количества осадков (рис. 21б, 34в). Например, в Республике Тыва, где и сейчас средние многолетние значения средней площади одного очага лесного пожара повышены по сравнению со средними значениями по округу, а регион ориентирован на развитие массового спортивно-охотничьего туризма, это может нанести серьезный ущерб.

Уральский федеральный округ. В состав Уральского федерального округа входят три туристских района: Западно-Сибирский равнинный, расположенный на севере Тюменской области и Уральский (Пермская, Свердловская и Челябинская области). Туризм на Урале активно развивается и представлен разнообразными формами: пешеходным, лыжным, водным, конным. Этому способствует, прежде всего, ландшафт региона, который подразделяется на средневысотный Северный Урал, низкогорный Средний Урал и среднегорный Южный Урал, и каждый из них формирует свой туристический кластер — альпинизм, спелеология, горнолыжный спорт и т. д. В пределах округа возможны туристские походы: пешие, лыжные, водные, спелеопоходы. По Курганской области проходит маршрут «Конный по Зауралью». Среди туристско-водников популярны сплавы по рекам Юрюзань, Сосьва, Пышма, Сылва, Тура. В пределах Пермского края, Свердловской и Челябинской областей, где расположены большие по площади особо охраняемые природные территории, такие как заповедники, заказники, национальные парки, активно развивается экологический

туризм. В округе прекрасные природные условия для лечебно-оздоровительного отдыха (естественные горячие пары и сухие газы углекисло-кислородного, азотно-кислородного составов), но наиболее развиваемое и перспективное направление в настоящее время — горнолыжный спорт.

Климат большей части территории резко-континентальный. Продолжительность благоприятного периода для летнего отдыха и туризма колеблется от нескольких дней на севере до 120 на юге. Высота снежного покрова меняется от 800 до 500 мм к югу, а продолжительность его залегания — от 205 до 170 дней.

В самый холодный период (декабрь–февраль) здесь преобладает умеренно морозная и морозная погода (75 %). Рекреационное использование горных районов на высотах свыше 1000 м в зимний период осложняется сильными метелями, когда скорость ветров достигает 40 м/с. В южной части округа зауральские территории характеризуются малоснежными зимами (300–400 мм с продолжительностью залегания 140–160 дней) и сильными метелями. Лето здесь жаркое и сухое в отличие от более северных и горных частей региона.

Для большей части территории Урала в настоящее время характерно суммарное повышение температуры воздуха как летом, так и зимой (рис. 22а, б), что благоприятно скажется на развитии указанных ранее видов рекреации. Прогноз на середину века подтверждает эту тенденцию.

Негативные факторы для рекреации, связанные с потеплением климата, заключаются, прежде всего, в увеличении риска инфицированности и заболеваемости отдыхающих в регионе трансмиссивными заболеваниями, переносимыми клещами (крымская геморрагическая лихорадка, клещевой энцефалит), и аридизации климата в результате роста испарения и уменьшения осадков в теплый период года на юге Тюменской, в Челябинской и Курганской областях, что приведет к утрате ландшафтной привлекательности в этих регионах в летнее время года и, следовательно, к уменьшению туристского потока.

Центральный федеральный округ. Территория ЦФО включает два туристских района: Центральный (Московская, Владимирская, Смоленская, Брянская, Калужская, Тульская, Ивановская и Рязанская области) и Южно-Российский (Курская, Орловская, Липецкая, Белгородская, Воронежская, Тамбовская, Пензенская области) — и занимает первое место в России по интенсивности развития туризма.

В регионе представлены все виды туристской деятельности. Наиболее перспективными в регионе климатозависимыми видами туризма являются сельский, экологический, активный, водный и рекреационный, но в целом этот федеральный округ, прежде всего, является центром культурно-познавательного и делового туризма.

В регионе благоприятный для отдыха умеренно-континентальный климат, позволяющий развивать как зимние (с ограничениями), так и летние виды активной рекреации практически на всей территории округа: комфортный с физиологической точки зрения сезон в настоящее время здесь начинается в мае и продолжается около 120 дней, а прогнозируемое на середину столетия увеличение этого периода составит от 1 месяца на севере региона до 1,5 — на юге.

К существенным рискам, связанным с изменением климата, здесь можно отнести повышение температуры воздуха, которое окажет негативное влияние на качество основного в столичном регионе культурно-познавательного вида рекреации. Увеличение повторяемости и продолжительности волн жары в сочетании с растущим числом дней с пожарной опасностью (Торжков и др., 2019) приведет к значительному сокращению числа дней, благоприятных для посещения столицы и культурных городских центров — Владимира, Ярославля и др.

Изменение климата окажет влияние и на зимние виды отдыха. К середине столетия на территории ЦФО ожидается повышение зимней температуры воздуха от 3 °С на западе региона и до 5 °С — на востоке.

В настоящее время именно северо-восточные области (Владимирская, Костромская и Ярославская) имеют преимущество для развития зимних видов спорта: здесь наиболее продолжительный (с ноября по начало апреля) период с высотой снега более 20 см

(с декабря — более 40 см), наибольшее число дней с комфортным для активного зимнего отдыха диапазоном температур (от -5 до -20 °С). Однако начавшаяся в середине 1980-х годов тенденция уменьшения высоты снега и продолжительности его залегания сохраняется и сейчас. И хотя по прогнозу к середине столетия в этих областях ожидается рост количества осадков, при таком подъеме температуры велика вероятность, что выпадать они будут в виде дождя и мокрого снега (рис. 23а, в).

Благоприятен прогноз для водных видов спорта: повышение температуры воздуха продлит сезон видов рекреации, связанных с открытыми водоемами, особенно на юге ЦФО.

Южный федеральный округ. На территории ЮФО расположены четыре туристских района: Республика Крым, Кавказско-Черноморский, Азовский и Нижнее Поволжье. В Крыму, Кавказско-Черноморском и Азовском (прибрежные районы Ростовской области и Краснодарского края) районах климат является туристским ресурсом, т. е. является составной частью социально-экономической жизни населения региона. Продолжительный период для комфортной рекреации (с начала мая до конца октября), небольшое количество пасмурных дней, теплое, но не жаркое лето, продолжительность купального сезона почти 5 месяцев (с конца мая по октябрь) — всё вместе это создает очень благоприятные условия для развития здесь различных видов туризма и рекреации (курортно-оздоровительный, пляжный, экологический, спортивный (дельтапланеризм, альпинизм, скалолазание, спелеотуризм), различные виды экстремального туризма). Несмотря на теплые зимы в горах развиты зимние виды рекреации, прежде всего горнолыжный туризм: на склонах гор в окрестностях Красной Поляны с ноября по май комфортные условия для горнолыжного катания.

Рекреационные ресурсы Северного Приазовья менее комфортны: зима мягкая, но устойчивого снежного покрова не образуется, и условия для зимней рекреации отсутствуют. Весна прохладная. Эти сезоны — не лучшее время для отдыха. Но лето и осень очень теплые, сухие, с обилием ясных дней.

Продолжительность комфортного пляжного сезона в базовом периоде составляет около 3 месяцев, а по прогнозу на середину столетия он будет продолжаться с 3-й декады мая до середины сентября. Исходя из современных социальных и экономических реалий, Приазовье — один из наиболее перспективных для развития рекреации регион России (ОД2, 2014), тем более что здесь прекрасные условия для экологического туризма, бердвотчинга, агротуризма. Северо-восточные акватории Азовского моря, где даже в теплый сезон от 20 до 55 дней могут быть штормовыми, привлекают любителей водного туризма.

В восточных степных районах ЮФО самое благоприятное время для рекреации в июне и сентябре, когда спадает изнуряющая жара в сочетании с крайне низкой влажностью (условия «сухого зноя») и пыльными бурями. Нет здесь условий и для активных видов зимней рекреации: снежный покров либо отсутствует, либо не превышает 10–15 см.

К середине столетия ожидается, что климатические ресурсы пляжного туризма возрастут на всех южных побережьях, но к концу века региональные прогнозы воздействия изменения климата на показатели климатического комфорта для рекреации свидетельствуют об интенсификации неблагоприятных термических условий из-за повышения максимальных температур выше критических уровней (Махов, 2013).

Неблагоприятным для восточных областей региона станет рост летних температур, который вызовет сокращение комфортных для рекреации дней. Кроме того, на юге России, на фоне уменьшения числа суток с умеренной пожароопасностью, прогнозируется заметное увеличение (на 8–10 сут.) числа дней с экстремально высокой пожароопасностью. Например, в настоящее время на территории Ростовской области пожароопасная обстановка V класса составит для отдельных пунктов наблюдений 4–6 дн./20 лет. Этот модельный прогноз следует рассматривать как весьма тревожный для экологических видов туризма.

Ожидаемые изменения количества атмосферных осадков к середине XXI в. (рис. 24г) также неблагоприятны для региона —

их повышение в Кавказско-Черноморской зоне, где и сейчас их выпадает 400 мм за лето, а уменьшение осадков в засушливых районах станет дополнительной причиной снижения здесь туристского потока из-за потери привлекательности ландшафтов.

Заключение

Как уже отмечалось во Введении, разработка и реализация адаптационных программ и программных мероприятий должны осуществляться с учетом не только производственно-отраслевой, но и региональной специфики. В работе «Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» (2011) указывается, что «...для обеспечения устойчивого развития российских регионов с учетом фактора изменений климата необходим переход к стратегическому типу планирования, сочетающего долгосрочную перспективу с системным подходом к разработке и реализации экономических программ и отдельных проектов и «встраивающего» указанный фактор в планы развития территорий и производственных комплексов регионов. Такая увязка призвана обеспечить снижение негативных последствий и максимальное использование благоприятных возможностей, которые открываются благодаря климатическим изменениям как непосредственно, так и опосредованно (через внедрение энергоэффективных и энергосберегающих технологий). Кроме того, она должна способствовать укреплению безопасности в регионах (например, путем развития систем мониторинга и раннего оповещения об опасных явлениях, программы адресной работы с коренными народами и другими особо уязвимыми группами населения и т. д.) и национальной безопасности России в целом». Упомянутые стратегии развития российских регионов необходимо гармонизировать с Национальным планом адаптации к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата, принятым 25 декабря 2019 г., который включает институциональные, организационные

и методические мероприятия, направленные на формирование государственных подходов к адаптации к изменениям климата.

В основе разработки адаптационных программ лежит вероятностное прогнозирование глобального и регионального климата, которое дает возможность получить количественные оценки будущих изменений широкого круга климатических показателей термического режима и режима увлажнения на территории России. Технологии вероятностного прогнозирования в России подлежат дальнейшему развитию, а полученные на их основе оценки — уточнению, в т. ч. за счет использования усовершенствованных модельных систем с высоким разрешением и оптимизированных подходов к построению ансамблей сценарных прогнозов.

Работа выполнена при поддержке Росгидромета в рамках направления 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций».

Авторы признательны Е. П. Самойловой и Т. В. Потехиной за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арутюнов А. Л. (2010). О перспективах использования основных и альтернативных видов топлива в сельскохозяйственном производстве России // Проблемы прогнозирования. № 3. С. 82–92.

Атаев З. А. (2016). Федеральные округа России: условия для развития возобновляемой энергетики // Проблемы безопасности российского общества. № 1. С. 137–145.

Аухадеев Т. Р., Переведенцев Ю. П. (2016). Ветроэнергетический потенциал Приволжского федерального округа // Российский журнал прикладной экологии. № 1 (5). С. 3–7.

Балонишникова Ж. А. (2021). Водные ресурсы регионов России для устойчивого экономического развития и гарантированного водообеспечения населения / В сб.: Водная драма в условиях глобальных трансформаций. Трехсторонний диалог по инновационной водной дипломатии и эффективному управлению водными ресурсами XXI века. – Москва–Женева. С. 66–68.

Баранская А. В., Романенко Ф. А., Арсланов Х. А., Петров А. Ю., Максимов Ф. Е., Пушина З. В., Тихонов А. Н., Демидов Н. Э. (2018). Верхнечетвертичные отложения Гыдана и арктических островов: реконструкция относительного уровня Карского моря в связи с вертикальными движениями земной коры за последние 50 тысяч лет // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. № 6. С. 56–71.

Барашов Н. Г., Домов Н. Г. (2020). Оценка и прогноз перспектив развития внутреннего туризма в регионах ПФО / Барашов Р. Г. / Актуальные проблемы и перспективы развития государственной статистики в современных условиях : сборник докладов Международной научно-практической конференции: в 2 томах, Саратов, 20–22 января 2020 года / ФГБУ «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова». – С. 45–48.

Бастрон А. В., Тремясов В. А., Цугленок Н. В., Чебодаев А. В. (2015). Ветроэнергетика Красноярского края. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т. 252 с.

Бердин В. Х., Кокорин А. О., Юлкин Г. М., Юлкин М. А. (2017). Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. – Москва: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 80 с.

Водные ресурсы России и их использование (2008) / под ред. И. А. Шикломанова. Санкт-Петербург: ГГИ. 600 с.

Галуллина Ю. В. (2018). Многолетняя динамика речного стока и его изменчивость по бассейнам рек Белая и Урал (в пределах Республики Башкортостан) // Геология, география и глобальная энергия. № 2 (69). С. 136–143.

Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г. (2018). Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. № 10. С. 8–16.

Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Грек Е. Н., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г. (2019). Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. № 11. С. 46–55.

Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Лобанова А. Г., Молчанова Т. Г. (2020). Условия формирования катастрофического паводка 2019 года на реке Ие и оценка его характеристик // География и природные ресурсы. № 4. С. 86–94.

Гировка Н. Н. (2015). Туристско-рекреационные ресурсы территорий: предпосылки формирования : монография. – Нижний Новгород: ННГАСУ. 294 с.

Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия

(сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад (2021) / под ред. Р. С.-Х. Эдельгериева. Т. 3. – Москва: ООО «Издательство МБА». 700 с.

Григорьева Е. А., Фетисов Д. М. (2009). Оценка пригодности климата района для спортивно-оздоровительной рекреации // Медицинская экология. № 6. С. 211–216.

Двинин Д. Ю. (2019). Характеристика материальной интенсивности альтернативной энергетики в регионах Российской Федерации // Вестник Евразийской науки. № 2. Т. 11. С. 1–9.

Дорохова И. А. (2019). Реакторы не любят погорячее. Страна Росатом. URL: <https://strana-rosatom.ru/2019/08/20/reactory-ne-ljubyat-pogoryachee/>.

Зорин И. В., Зорин А. И., Ирисова Т. А., Сергеева Т. К., Нелюбин В. В., Гвозденко А. А., Волошин Н. И., Квартальнов В. А. (2001). Менеджмент туризма. Туризм и отраслевые системы. – Москва: Финансы и статистика. 270 с.

Игнатьева А. В., Кнауф Р. В. (2020). Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исследования. № 1. С. 66–77. DOI 10.17223/25421379/14/5.

Калабина М. В., Зворыкина Ю. В. (2019). О проявлениях глобальных изменений климата в Арктике // Российская энергетика и энергосбережение. № 5–6. С. 38–42.

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

Керимов А. М., Гегиев К. А., Анаев М. Т., Гергокова З. Ж. (2018). Изменение селевой активности в бассейне реки Черек-Безенгийский в связи с интенсивной деградацией оледенения // Грозненский естественнонаучный бюллетень. Т. 3. № 2 (10). С. 43–48.

Климатические факторы возобновляемых источников энергии (2010) / В. В. Елистратов [и др.] / под ред. В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой, Г. В. Сидоренко. – Санкт-Петербург: Наука. 235 с.

Кондратьева О. Е., Мясникова Е. М., Локтионов О. А., Воронков Д. А. (2019). Выявление климатических факторов, влияющих на надежность воздушных линий электропередачи / Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, Юго-Западный государственный университет. – Курск: Изд-во ЮЗГУ. С. 373–377.

Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России (1994) / Ю. К. Шафранник, В. В. Бушуев, П. П. Безруких [и др.]. – Москва: Минтопэнерго РФ. 95 с.

Котилко В. В., Фарков А. Г. (2013). Потенциал развития возобновляемых источников энергии в аграрных регионах Западной Сибири // Экономика и природопользование. № 15 (294). С. 14–20.

Лукутин Б. В., Кушукина В. Р. (2006). Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии. – Томск: Изд-во ТПУ. 202 с.

Махов С. Ю. (2013). Оценка рекреационных систем / МОО «Академия безопасности и выживания». – Москва. 210 с.

МГЭИК (2014а). Изменение климата, 2014 г.: Воздействия, адаптация и уязвимость. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. – ВМО. 40 с.

МГЭИК (2014б). Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Р. К. Пачаури и Л. А. Мейер. – МГЭИК, Женева, Швейцария. 163 с.

Никольченко Ю. Н., Сухова М. Г. (2013). Ветроэнергетический потенциал Алтайского края как составляющая устойчивого развития региона // Вестник ТГУ. Т. 18. Вып. 2. С. 666–667.

Оборин М. С., Ермакова Л. Н., Баталова А. Г. (2014). Оценка степени благоприятности погодных условий Приволжского федерального округа для целей рекреации и санаторно-курортного лечения // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». № 2. С. 162–170.

ОД2 (2014). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – Москва: Росгидромет. 1009 с.

Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (2011) / В. М. Катцов, Н. В. Кобышева, В. П. Мелешко [и др.]; под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева – Москва: Д'АРТ. 252 с.

Панкратьева С. Г. (2019). Современное состояние и перспективы развития энергетики Хабаровского края // Власть и управление на Востоке России. № 3 (88). С. 156–163.

Промышленные системы охлаждения. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (2016). – Москва: Бюро НДТ. 328 с.

ПУЭ-7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.

Разумов В. В., Кольчев А. Г., Шагин С. И. (2012). Природные опасности в рекреационных зонах Приэльбрусья // ГеоРиск. № 1. С. 28–38.

Смирнова Е. М., Сендеров С. М. (2019). Анализ тенденций изменения состояния энергетической безопасности регионов на примере Сибирского федерального округа // Энергетическая политика. № 1. С. 75–83.

Смолина С. Г. (2009). Оценка перспектив развития речного транспорта России на основе прогноза изменений стока и морфодинамики гидросети вследствие глобального потепления климата // Труды ИСА РАН. Т. 4. С. 221–237.

СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) № 891/пр от 3 декабря 2016 г. и введен в действие с 4 июня 2017 г. Пересмотр СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318>.

Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Центрального федерального округа на 15.03.2021 г. Подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/7b3d9ba6c8bf668640b5ad761911e8fa.pdf>.

Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) (2010). — Москва: ИАЦ Энергия. С. 84.

Стадник В. В., Ключева М. В., Задворных В. А., Самойлова Е. П. (2020). Влияние наблюдаемых изменений климата на транспортную отрасль экономики (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды ГГО. Вып. 599. С. 7–25.

Стратегия социально-экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа на период до 2035 года. Постановление ЗС ЯНАО, дата регистрации 24.06.21. 219 с.

Торжков И. О., Кушир Е. А., Константинов А. В., Королева Т. С., Ефимов С. В., Школьник И. М. (2019). Прогнозируемые изменения климата и их влияние на лесной сектор экономики России // Метеорология и гидрология. № 3. С. 40–49.

Турбогенератор ЛАЭС, отключенный из-за жары, заработал в полную мощь. Атомная энергия 2.0. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/05/06/12294>.

Туристский паспорт регионов РФ. Проект Министерства Культуры РФ. URL: <http://utp.nbcrs.org/>.

Тюсов Г. А., Акентьева Е. М., Павлова Т. В., Школьник И. М. (2017). Оценки возможного влияния будущих изменений климата России на функционирование объектов энергетики // Метеорология и гидрология. № 12. С. 47–57.

Хлебникова Е. И., Салль И. А. (2012). Климатические воздействия на инфраструктуру прибрежных территорий России в первой половине века // Метеорология и гидрология. № 5. С. 84–126.

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

Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М. (2019б). Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // *Метеорология и гидрология*. № 7. С. 5–16.

Хлебникова Е. И., Школьник И. М., Рудакова Ю. Л. (2021). Вероятностные оценки изменения прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 7. № 2. С. 140–158. DOI 10.21513/2410-8758-2021-2-140-158.

Шеклеин С. Е., Велькин В. И. (2012). Атомная энергетика и возобновляемые источники энергии — фундамент энергетической безопасности будущего // *Альтернативная энергетика и экология*. № 3. С. 119–121.

Энергетическая стратегия России до 2030 года (2009). – Москва: Минэнерго РФ.

Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S. (2018). Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Climate Dynamics*. V. 50. P. 215–230. DOI 10.1007/s00382-017-3600-6.

SREX (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
НА ОСНОВНЫЕ ОТРАСЛИ ДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ**

Е. М. Акентьева

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: eakentyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 3.04.2022
Поступила после доработки 28.05.2022

На территории Российской Федерации добываются практически все известные виды полезных ископаемых. В добывающей промышленности страны выделяются две большие группы производств: добыча топливно-энергетических полезных ископаемых (нефти, газа, угля, торфа, урановой руды) и добыча других полезных ископаемых (руд черных и цветных металлов, нерудных полезных ископаемых, т. е. сырья для химической промышленности и производства строительных материалов, а также алмазов). Как отмечается во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014), добывающая промышленность стоит на первом месте по уровню variability доходов, связанных с воздействием метеорологических факторов. Особенности воздействия климатических изменений на объекты и процессы в добывающей промышленности зависят, главным образом, от способа добычи полезных ископаемых (закрытого, т. е. с использованием скважин и шахт, или открытого, т. е. карьерного), физических и химических свойств добываемого сырья и последствий для окружающей среды.

Добыча нефти и газа

Разработка месторождений нефти и газа производится в основном путем строительства буровых вышек для создания нефтяных и газовых скважин. Наибольшее развитие нефтегазовый сектор России получил в Арктической зоне. В этом регионе наиболее значительные климатические риски для устойчивого функционирования нефтегазового комплекса обусловлены экстремальными температурно-ветровыми условиями (табл. 1), а также медленными климатическими изменениями, приводящими к росту уровня моря, таянию многолетнемерзлых пород, разрушению берегов и прибрежной инфраструктуры. В большинстве районов добычи углеводородов примерно 60 % аварий связано с метеорологическими факторами (Руководство..., 2008).

Таблица 1

Критические значения характеристик температуры воздуха и скорости ветра для функционирования нефтегазового комплекса (Руководство..., 2008)

Параметр	Последствия для инфраструктуры нефтегазового комплекса
Температура воздуха ниже -15°C	Осложняется сварка полиэтиленовых труб (проведение сварочных работ необходимо проводить в отапливаемых помещениях)
Температура воздуха ниже -25°C	Увеличивается загустение нефти и затрудняется ее перекачивание
Температура воздуха ниже -30°C	Необходимо утепление трубопроводов и использование морозостойких материалов, следовательно, происходит удорожание работ
Температура воздуха ниже -40°C	Требуется использование легированных сталей, образуются пробки и свищи в трубопроводах. Прекращаются работы на открытом воздухе
Скорость ветра более 22 м/с (независимо от температуры воздуха)	Прекращается монтаж буровых вышек, затрудняется сварка труб, прекращается ремонт скважин и наземных сооружений

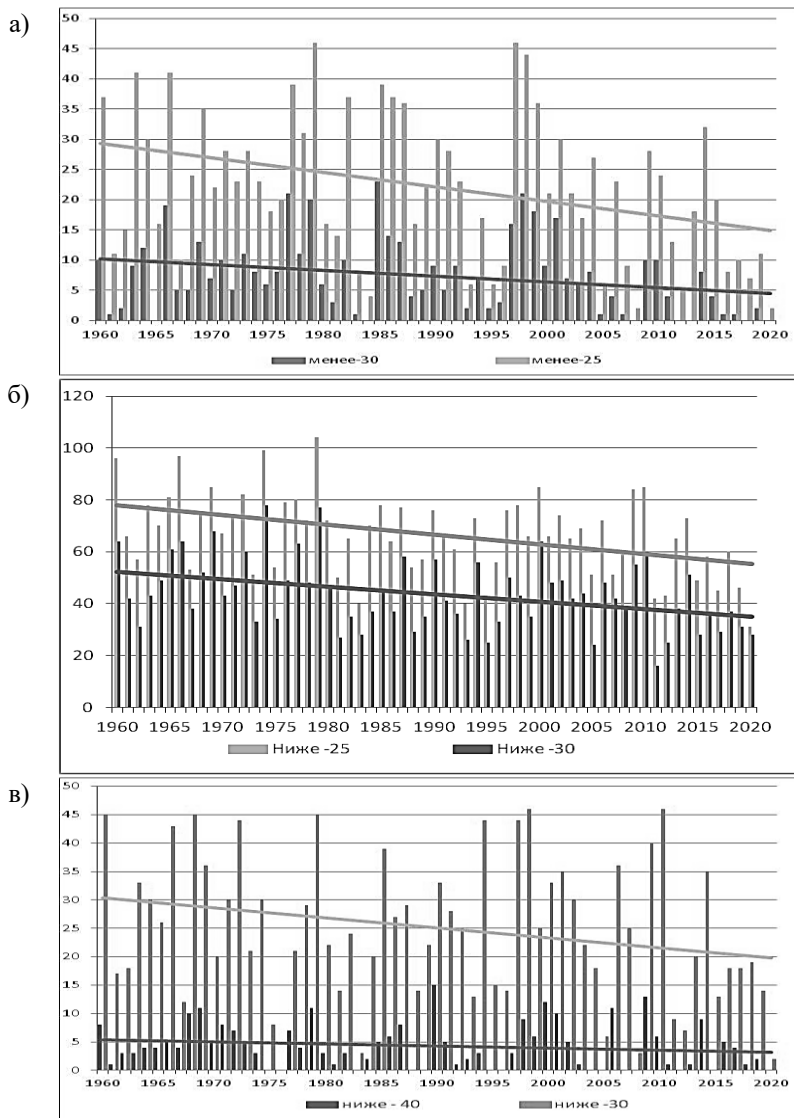


Рис. 1. Число дней с температурой воздуха ниже пороговых значений в 1960–2020 гг.: а) ниже -30 и -25 °С, Варандей (Ненецкий а.окр.); б) ниже -40 и -30 °С, Надым (Ямало-Ненецкий а.окр.); в) ниже -30 и -25 °С, Игарка (Красноярский край)

Повышение температуры воздуха в Арктической зоне России (рис. 1) в целом благоприятно сказывается на работе нефтегазового комплекса, так как улучшаются условия труда на открытом воздухе, уменьшаются простои, снижается величина эксплуатационных расходов, сокращается потребление энергии за отопительный период.

Потепление климата высоких широт протекает на фоне большой временной изменчивости климатических характеристик (от суток до десятилетий) на региональном и локальном уровнях. Поэтому низкие температуры воздуха по-прежнему возможны, но их вероятность уменьшается. Анализ нормативных документов, определяющих условия исполнения, эксплуатации, хранения и транспортировки машин и других технических изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды (ГОСТ 15150-69, 2013; ГОСТ 16350-80, 2021), показал, что, несмотря на потепление, границы климатического района с холодным климатом, определенные по средней месячной температуре воздуха января и июля и по среднему из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха, существенно не изменились. Это связано с широкими диапазонами температурных условий, заложенных в ГОСТах.

По данным региональной климатической модели ГГО (РКМ ГГО), сокращение продолжительности периода с температурой ниже -30°C к середине XXI в. составит на территории Северной Евразии от 10 до 40 дней, а индекс потребления энергии сократится на 10–20 % (Хлебникова и др., 2018, 2019а) (рис. 2).

Увеличение температуры воздуха имеет и свои негативные последствия для добывающей промышленности. Так, уменьшение ледовитости арктических морей приводит к усилению береговой эрозии из-за более частого воздействия штормов, особенно на побережье Берингова и Карского морей, что угрожает портовым причалам. В этом отношении показателен пример порта Варандей, действующего круглогодично и являющегося самым северным нефтяным терминалом в мире.

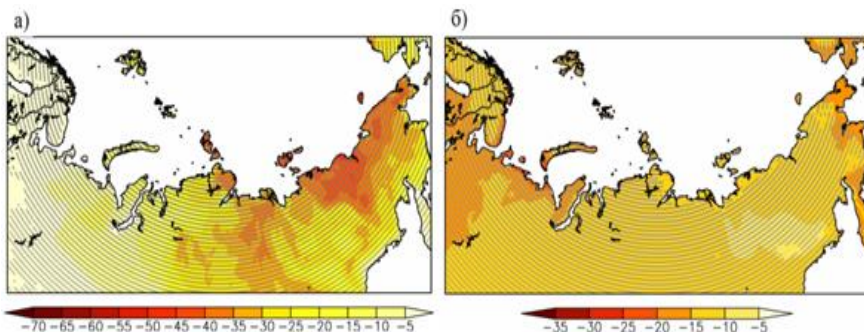


Рис. 2. Изменение средних многолетних значений климатических показателей к середине XXI в. по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг. по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5 (Хлебникова и др., 2018): а) число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже -30°C ; б) индекс потребления энергии за отопительный период, %

Повреждения, нанесенные побережью при строительстве и эксплуатации портовой инфраструктуры, увеличили естественную скорость эрозии береговой линии, достигающей здесь 2–3 м в год. Этот район побережья Баренцева моря является примером совместных воздействий изменения климата и нарушений, обусловленных человеческой деятельностью. Территории, уже затронутые деятельностью человека, часто становятся более уязвимыми для воздействий изменения климата.

Более теплая погода провоцирует и риски уменьшения добычи газа, так как рост повторяемости температуры воздуха выше 15°C (рис. 3а) приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива (Руководство..., 2008).

Рост температуры воздуха в теплый период года (рис. 3б) может увеличить вероятность лесных пожаров, угрожающих объектам нефтегазового комплекса, а также способствовать образованию смерчей, которые раньше в Арктической зоне России не отмечались. Однако в настоящее время по данным наблюдений повторяемость смерчей возрастает. Более теплые условия способствуют и несвоевременному таянию «зимников» (включая движение по рекам), часто являющихся основными дорогами в районах нефте-

и газодобычи на севере и северо-востоке РФ. Следовательно, значительно сокращается время возможного перемещения людей и грузов, что создает дополнительные риски для снабжения нефтегазового комплекса (ОД2, 2014).

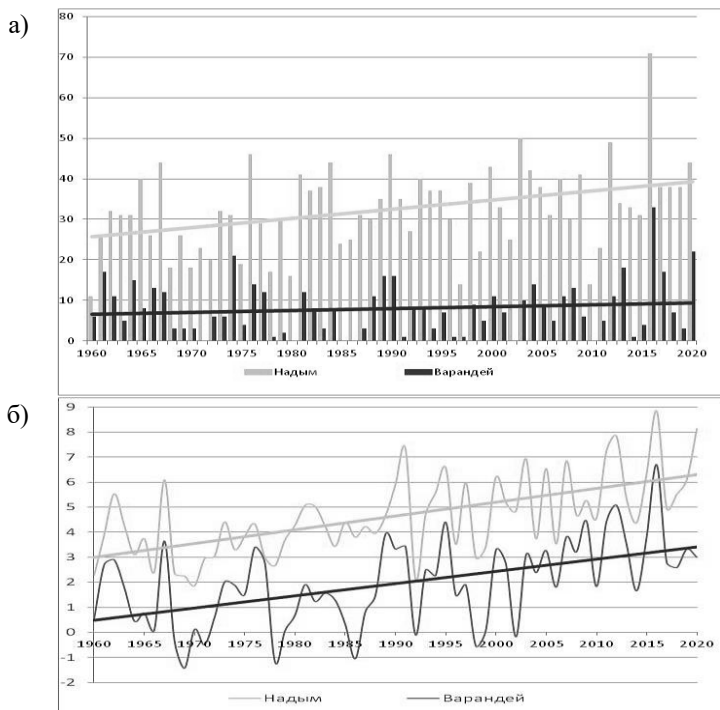


Рис. 3. Изменение температурного режима теплого периода в 1960–2020 гг., Варандей (Ненецкий а.окр.), Надым (Ямало-Ненецкий а. окр.):
 а) число дней с температурой воздуха выше 15 °С;
 б) средняя температура теплого периода (апрель–октябрь)

Изменение скорости ветра носит более сложный характер. При незначительном уменьшении средних скоростей максимальные скорости ветра в северных регионах Западной Сибири

не уменьшаются и даже имеют тенденцию к возрастанию (рис. 4), что может негативно отражаться как на условиях работы на открытом воздухе, так и на величине ветровых нагрузок на буровые установки. Анализ трендов скорости ветра проводился по данным с 1977 г., так как с этого времени ряды наблюдений за ветром стали более однородными в связи с внедрением на сети метеорологических станций анеморумбометров.

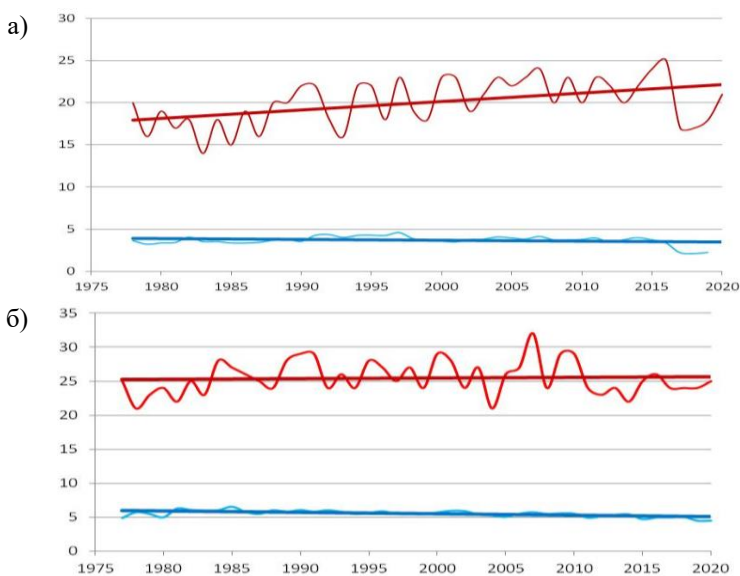


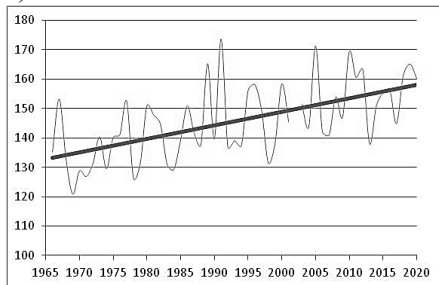
Рис. 4. Средняя (синие линии) и максимальная (красные линии) скорости ветра, м/с, в 1975–2020 гг. в Ямало-Ненецком а. окр.:
а) Надым; б) Новый Порт

Важными причинами снижения эксплуатационного ресурса практически всех видов оборудования для нефте- и газодобычи являются коррозионные повреждения. Увеличение продолжительности выпадения жидких и смешанных осадков, изменение относительной влажности и температуры воздуха являются основными факторами, определяющими возрастание коррозионной агрессивности атмосферы и интенсивность разрушения

металлических конструкций. Существуют различные виды коррозии металлов: сухая (под действием температуры и загрязненного воздуха), влажная (наиболее активна при относительной влажности более 70 %), мокрая (при непосредственном соприкосновении с водой, т. е. с туманом, осадками) — наиболее быстрый и опасный тип коррозии. В большинстве случаев все виды атмосферной коррозии воздействуют одновременно. При этом наиболее значимыми факторами являются продолжительность периодов с относительной влажностью более 70 % при температуре воздуха выше -1°C и число дней с жидкими и смешанными осадками (ГОСТ СССР..., 1991; ГОСТ ISO 9223-2017, 2018). В настоящее время увеличение этих двух показателей отмечается во многих районах добычи углеводородов (рис. 5, 6).

Большинство объектов газовой и нефтяной отраслей находятся в зоне многолетней мерзлоты. В настоящее время сохраняется тенденция увеличения мощности сезонно-талого слоя вечной мерзлоты. Последствия таяния многолетней мерзлоты носят комплексный характер и обуславливают транспортные риски (разрушение автомобильных и железных дорог, трубопроводов, ухудшение состояния взлетно-посадочных полос), а также риски снижения производительности нефтяных скважин, так как при таянии мерзлоты скважины деформируются, и их последующее восстановление приводит к потерям добычи нефти на 10–20 % (Руководство..., 2008). Изменения климата оказывают значительное влияние на состояние трубопроводов. В зоне сезонного промерзания грунтов аварийные разрушения трубопроводов часто происходят в районах со сложными гидрогеологическими условиями, для которых характерен высокий риск возникновения оползневых и селевых процессов. Важнейшим фактором, определяющим степень развития этих процессов, является количество и интенсивность осадков. В таких условиях ожидаемое увеличение сезонных сумм осадков и особенно их интенсивности в теплый сезон является серьезным дополнительным фактором риска, который необходимо принимать во внимание при эксплуатации существующих и проектировании новых трубопроводов.

а)



б)

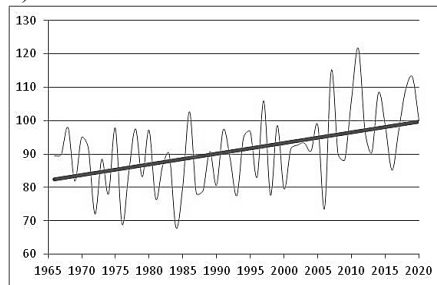
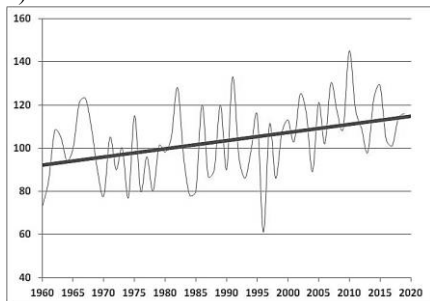


Рис. 5. Годовое число дней с относительной влажностью воздуха более 70 % при температуре воздуха выше -1°C в 1965–2020 гг.:
а) Варандей (Ненецкий а. окр.); б) Игарка (Красноярский край)

а)



б)

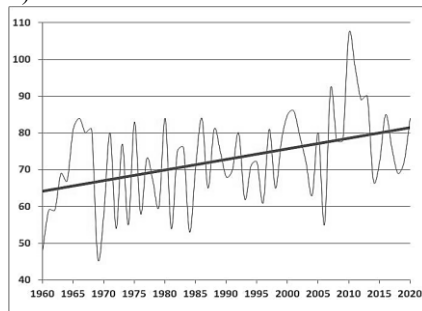


Рис. 6. Годовое число дней с жидкими и смешанными осадками в 1960–2020 гг.: а) Елецкая (Республика Коми);
б) Норильск (Красноярский край)

Добыча угля, металлических руд, алмазов

Погодно-климатические риски, характерные для добычи полезных ископаемых в карьерах и шахтах, обусловлены изменением температурного режима и режима увлажнения.

Примером воздействия климатических изменений на добычу железной руды может служить ситуация, сложившаяся на территории Курской магнитной аномалии (КМА). Добыча руды в КМА идет

в основном открытым способом. В процессе техногенеза на месте естественных форм рельефа возникли новые формы: карьеры, достигающие глубины 600 м, отвалы, подземные пустоты и т. д. Перемещение огромного объема горных масс, изменение местного базиса эрозии и разрушение горных массивов с образованием дисперсных обломочных фракций способствовало развитию экзоморфодинамических процессов (эрозия, дефляция, оползни, суффозия, карст, обвалы горных масс, прорывы плывунов и др.) (Петин, Яницкий, 2007). В результате на поверхности земли сформировался техногенный ландшафт, существенно изменивший ветровой, эрозионный и водный режим района. Режим подземных вод на территории КМА нарушился в результате работы дренажных систем карьеров и шахт. В связи с постоянным откачиванием из карьеров грунтовых вод образовалась депрессионная (обессушивающая) воронка площадью около 300 км² (Гидродинамический режим..., 2013). Техногенные грунты легко размываются дождями и тальми водами, а при высыхании разрушаются под действием ветровой эрозии. В районе КМА повышение средней температуры воздуха в холодный и теплый периоды года, увеличение максимальной суточной температуры воздуха и сумм осадков, а также повторяемости периодов без осадков создают значительные риски для объектов добывающей промышленности, нарушая целостность инфраструктуры и работу дренажных систем карьеров.

Увеличение сумм осадков и числа дней с жидкими и смешанными осадками, наблюдающееся во второй половине XX – начале XXI в. во многих районах добычи каменного и бурого угля, приводит к дополнительному намоканию угля на открытых топливных складах. Это уменьшает тепловую экономичность энергоустановок, использующих это топливо, затрудняет его транспортировку. Изменение режима увлажнения особенно характерно для Сибирского ФО, где сосредоточено более 80 % запасов угля России (рис. 7), а также для Дальневосточного ФО.

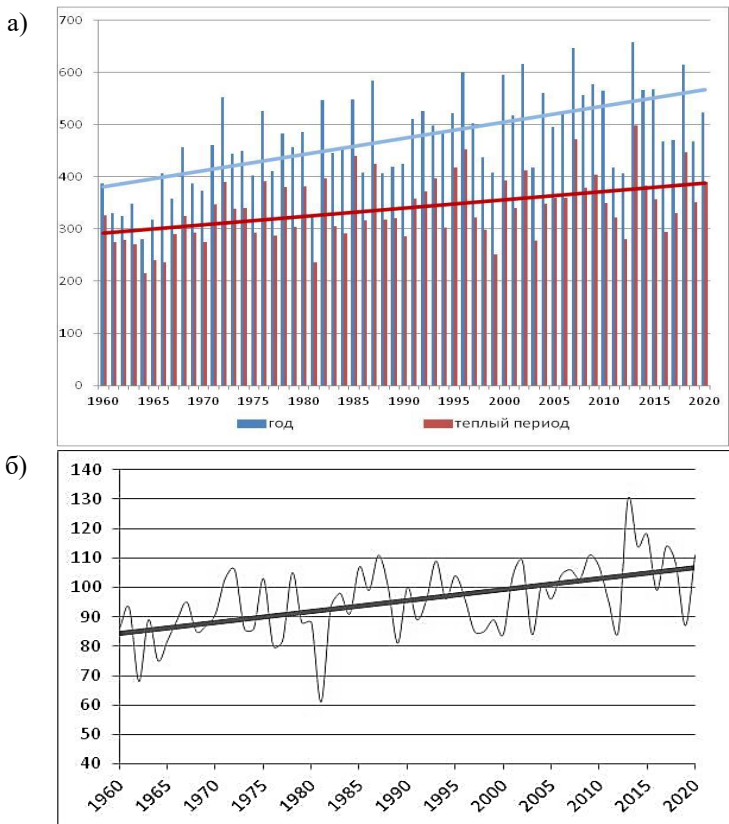


Рис. 7. Изменение режима увлажнения в Кемерово (Кузбасс) в 1960–2020 гг.: а) сумма осадков, мм, за год и теплый период (апрель–октябрь); б) число дней с жидкими и смешанными осадками

Увеличение испарения (рис. 8) создает в засушливые периоды угрозу высыхания и пыления терриконов.

По данным региональной климатической модели ГГО к середине XXI в. в южных районах Европейской части России и Западной Сибири ожидается небольшое (на 2–4 дня), но значимое увеличение продолжительности сухих периодов (с суточной суммой осадков менее 1 мм) в течение теплого сезона (Хлебникова и др., 2019б).

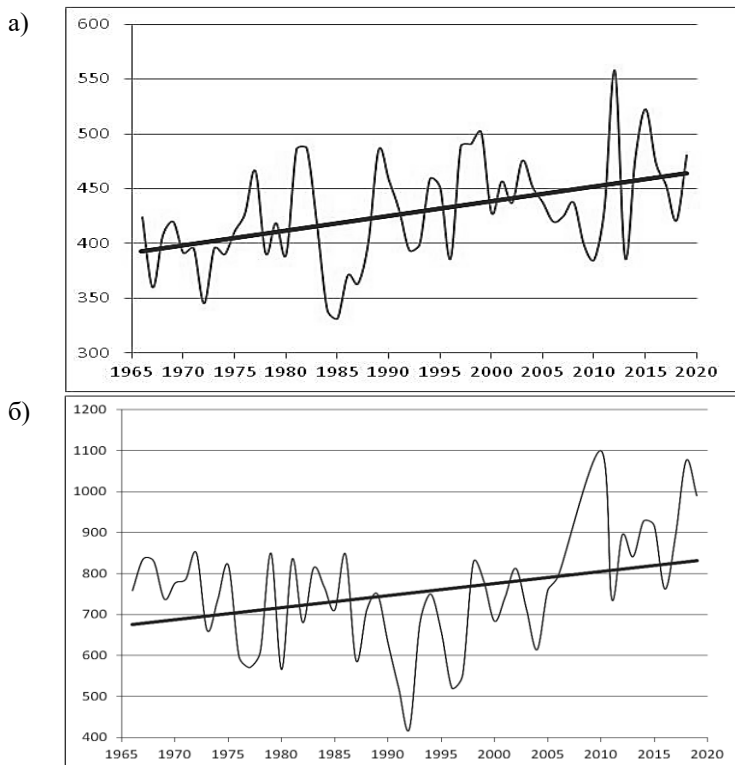


Рис. 8. Годовая сумма испарения, мм:
 а) Кемерово (Кузбасс);
 б) Ростов-на-Дону (Ростовская область)

В последние десятилетия во многих регионах страны, в том числе и там, где добыча угля и других полезных ископаемых производится шахтным методом, наблюдается резкое повышение интенсивности осадков (рис. 9).

Интенсивные осадки, выпадающие за короткие интервалы времени, представляют значительную опасность для работы шахт и могут приводить к катастрофическим последствиям, так как шахтные дренажные системы были спроектированы по климатическим данным второй половины XX в.

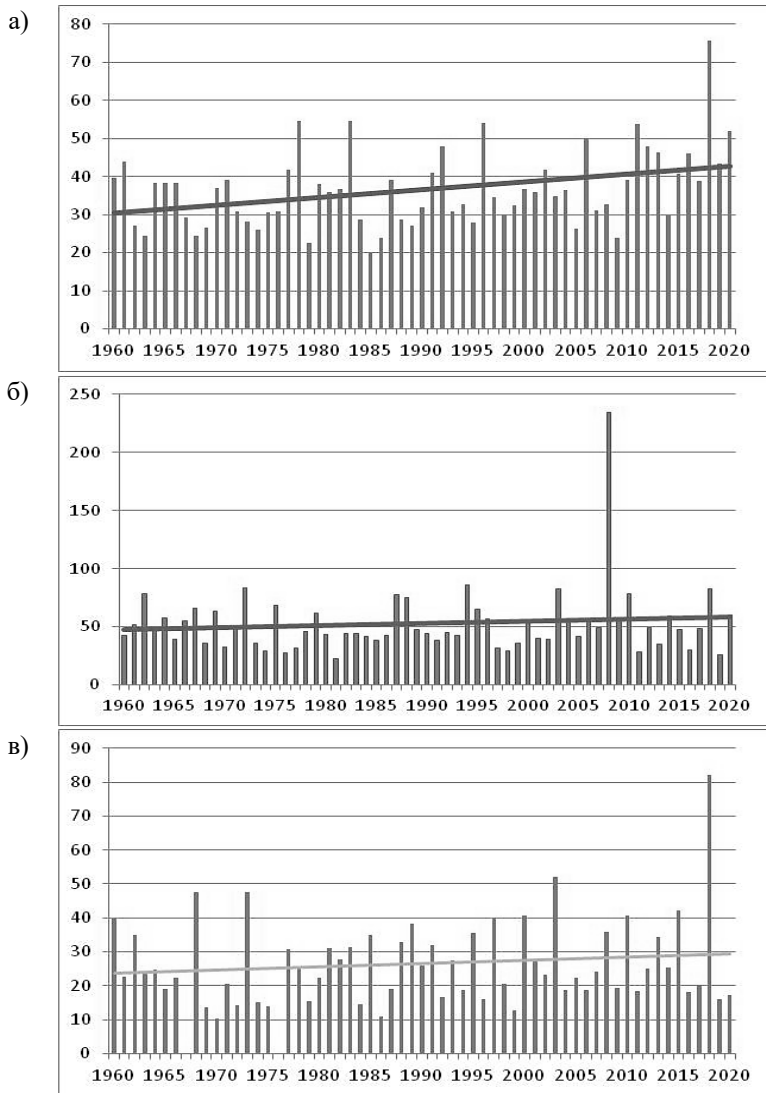


Рис. 9. Суточный максимум осадков, мм, в 1960–2020 гг.:

а) Ростов-на-Дону (Ростовская область);

б) Мазаново (Амурская область);

в) Мирный (Республика Саха)

Так, экстремальный дождь (82 мм за сутки), выпавший в августе 2018 г. в районе г. Мирный (Республика Саха), затопил шахту, где велась добыча алмазов. Сумма осадков при этом не только значительно превысила предыдущий суточный максимум (52 мм), но и практически сравнялась с его расчетным значением, возможным 1 раз в 100 лет. Системы водоотведения в шахте не были рассчитаны на такое количество осадков, что привело к гибели людей, попаданию загрязненной воды в систему городского водоснабжения, наложению значительных штрафов на компанию АЛРОСА и закрытию шахты.

По данным региональной климатической модели ГГО, суточные максимумы осадков возрастут к середине XXI в. на значительной территории России, прежде всего в Якутии и северо-восточных регионах страны на 10–20 % (рис. 10) (Хлебникова и др., 2018, 2019б; Катцов и др., 2020).

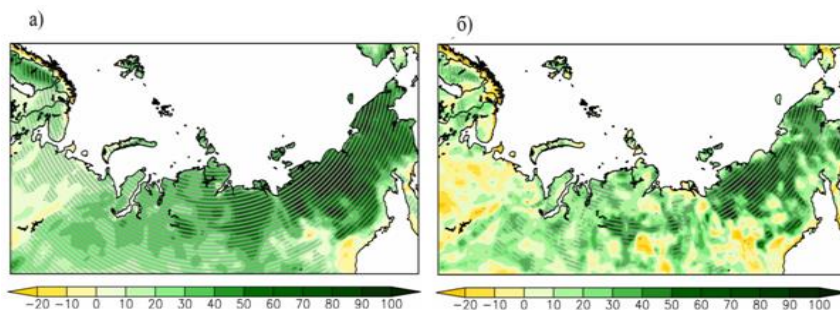


Рис. 10. Изменение средних многолетних значений максимума суточных сумм осадков, %, к середине XXI в. по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг. по данным РКМ ГГО, сценарий RCP8.5 (Хлебникова и др., 2018): а) при отрицательной температуре воздуха; б) при положительной температуре воздуха

Изменение режима осадков и испарения необходимо также учитывать при проектировании и эксплуатации хвостохранилищ — гидротехнических сооружений, предназначенных для хранения или захоронения радиоактивных, токсичных и других отвальных отходов обогащения полезных ископаемых (такие отходы именуют хвостами).

Риски, связанные с обильными осадками, включают: обрушение дамбы хвостохранилища, сброс загрязненной воды в прилегающие водоемы, сопутствующие затраты на восстановление, увеличение экологической ответственности, воздействие на здоровье и безопасность населения (ГОСТ Р 55100-2012..., 2019; Руководящие принципы..., 2014; Глобальный отраслевой стандарт..., 2020).

Основные мероприятия по обеспечению безопасности хвостохранилищ должны быть направлены на минимизацию ущерба от их разрушения, сокращение фильтрационных потерь и потерь от пыления.

Эффективное и безопасное удаление отходов горнодобывающих предприятий сопряжено с решением сложных технических и природоохранных задач в период их эксплуатации, вывода из эксплуатации и рекультивации.

Эффективное и безопасное удаление отходов горнодобывающих предприятий сопряжено с решением сложных технических и природоохранных задач в период их эксплуатации, вывода из эксплуатации и рекультивации.

Этот вопрос необходимо особенно тщательно рассматривать в связи с изменением климата, которое может привести к повышению вероятности промышленных аварий в результате таких стихийных бедствий, как наводнения, засухи, природные пожары, смерчи и т. д. (Mason et al., 2013; Climate risk assessment..., 2015).

Адаптация добывающей промышленности к изменениям климата

Изменение климата заставляет горнодобывающие компании более детально оценивать риски, связанные с климатическими факторами, так как потери вследствие аварий практически всегда превышают затраты на обеспечение надлежащего уровня эксплуатационной безопасности и контроля для предотвращения инцидентов на объектах добывающей промышленности. Решению этих вопросов посвящено большое количество исследований (Руководящие принципы..., 2014;

Smith, 2013; Climate adaptation..., 2014; Climate Change..., 2019; Mavrommatis et al., 2019; Resilience..., 2021; и др.).

Анализ этих работ позволяет обозначить превентивные адаптационные меры в добывающей промышленности.

Необходимы индивидуальные климатические прогнозы для каждого объекта добывающей промышленности, которые позволят создать реестр погодно-климатических рисков для современного и будущего климата и разработать стратегии адаптации конкретного объекта для повышения устойчивости его и прилегающих к нему регионов к изменению климата. Оценка рисков может выполняться по следующим основным позициям:

- анализ возможных аварий, связанных с экстремальными погодными явлениями (например, ливень, засуха) или с общим потеплением (таяние снега, мерзлоты);
- вероятность аварий при разных сценариях изменения климата;
- степень устойчивости основных объектов инфраструктуры к разным типам воздействия;
- потенциальная цена аварий;
- мониторинг рисков и предупреждения / восстановления последствий аварий.

Должен быть разработан системный подход к управлению безопасностью хвостохранилищ в течение их жизненного цикла «планирование — строительство — эксплуатация — закрытие — рекультивация» с учетом изменения климата.

Целесообразно создавать резервные водохранилища для хранения технологических растворов и сбора излишней дождевой воды.

В районах с дефицитом водных ресурсов необходимо принятие мер, направленных на сокращение потерь от испарения с поверхности хвостохранилищ для предотвращения их высыхания и пыления.

В условиях повышения температуры воздуха необходим поиск решений для эффективного охлаждения подземных сооружений шахт.

Требуется увеличение инвестиций горнодобывающих компаний в комплексные программы управления водосборными бассейнами, что послужит улучшению местного водоснабжения и позволит защитить существующие источники воды и окружающей среды в целом.

Существенные риски могут возникнуть на послеоперационной фазе шахт и карьеров, так как большинство из них имеют относительно короткий срок службы и не предполагается, что они будут работать, когда проявятся наиболее серьезные последствия изменения климата. С эксплуатационной точки зрения эти шахты могут быть спроектированы без учета будущего климата. Однако после вывода таких объектов из эксплуатации и их закрытия реальным становится риск разрушения конструкций под воздействием происходящих климатических изменений.

Основные адаптационные меры в добывающей промышленности в области климатического обслуживания заключаются в регулярном обновлении климатических параметров, входящих в нормативные документы по проектированию, строительству и эксплуатации объектов добычи и транспортировки полезных ископаемых, включение в эти документы информации о наблюдаемых и ожидаемых изменениях климатических условий в районах проведения работ.

Работа выполнена при поддержке Росгидромета в рамках направления 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гидродинамический режим Белгородской области (2013) / ОАО «Московский научно-производственный центр геолого-экологических исследований и использования недр «Геоцентр-Москва». URL: <https://web.archive.org/web/20131029192037/http://geocentrmsk.ru/content/view/361>.

Глобальный отраслевой стандарт управления хвостохранилищами (2020) / Международный совет по горнодобывающей промышленности и металлургии. URL: <https://globaltailingsreview.org/resources/>.

ГОСТ 15150-69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия

климатических факторов внешней среды (с изменениями) (2013). – М.: Стандартиформ. 60 с.

ГОСТ 16350-80. Государственный стандарт СССР. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей (2021). – М.: Издательство стандартов. 150 с.

ГОСТ ISO 9223-2017. Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы (2018). – М.: Стандартиформ. 17 с.

ГОСТ Р 55100-2012. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в горнодобывающей промышленности (2019). – М.: Стандартиформ. 14 с.

ГОСТ СССР. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы (1991). – М.: Издательство стандартов. 44 с.

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

ОД2 (2014). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. – М.: Росгидромет. 1009 с.

Петин А. Н., Яницкий Е. Б. (2007). Экологический менеджмент и опыт внедрения экологических стандартов в Белгородской области // *Проблемы региональной экологии* / Ин-т географии РАН. № 6. С. 14–17.

Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами (2008) / под редакцией Н. В. Кобышевой. – СПб. 336 с.

Руководящие принципы и надлежащая практика обеспечения эксплуатационной безопасности хвостохранилищ (2014) / ЕЭК ООН. 48 с.

Хлебникова Е. И., Катцов В. М., Пикалева А. А., Школьник И. М. (2018). Оценка климатических факторов экономического развития территории российской Арктики в XXI веке // *Метеорология и гидрология*. № 6. С. 5–17.

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

Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М. (2019б). Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // *Метеорология и гидрология*. № 7. С. 5–16.

Climate Adaptation in the Canadian Mining Sector. Mining Association of Canada (2014). P. 31. URL: https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/02/Climate_Adaptation_in_the_Canadian_Mining_Sector_2014.pdf.

Climate Change – The Mining Association of Canada. Towards Sustainable Mining. Tailings Management Protocol. Version date: February 2019. URL: https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/03/Tailings-Management-Protocol_2019-final.pdf.

Climate Risk Assessment for the Oil & Gas Sector. Northeastern British Columbia (2015). URL: https://retooling.ca/wp-content/uploads/2020/10/Climate_Assessment_NEBC_2015_web.pdf.

Mason L., Unger C., Lederwasch A., Razian H., Wynne L., Giurco D. (2013). Adapting to climate risks and extreme weather: a guide for mining and minerals industry professionals / National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast. P. 79.

Mavrommatis E., Damigos D., Mirasgedis S. (2019). Towards a Comprehensive Framework for Climate Change Multi-Risk Assessment in the Mining Industry // Infrastructures. № 4 (3). P. 38. DOI: 10.3390/infrastructures4030038.

Resilience in the Mining and Energy sector (2021). URL: <https://retooling.ca/taking-action/mining-and-energy/>.

Smith M. H. (2013). Assessing Climate Change Risks and Opportunities: Mining and Minerals Processing sector. DOI: 10.13140/RG.2.1.2802.8403.

О ВЛИЯНИИ КЛИМАТА НА ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ

Е. М. Акентьева, В. В. Стадник, Д. В. Фасолько, В. А. Задворных

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: eakentyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022
Поступила после доработки 28.05.2022

Энергетика является базовой отраслью экономики России, обеспечивающей потребности страны в электрической и тепловой энергии. Процесс устойчивого и опережающего развития электроэнергетической отрасли, в свою очередь, является необходимым фактором успешного экономического развития России.

Энергетика является одним из наиболее климатозависимых секторов экономики. Климатические условия определяют потребность в энергии, следовательно, их изменение может существенно изменить тепло- и энергопотребление во многих регионах России. От климатических условий во многом зависят особенности функционирования и технико-экономические показатели всех типов электростанций, а также экологические последствия деятельности объектов энергетики.

Специфика энергетики заключается в том, что продукцию этой отрасли практически невозможно накапливать и сохранять, поэтому потребности в энергии должны быть спрогнозированы и учтены заранее с учетом изменения климата для необходимости корректировки проектирования и эксплуатации электростанций.

Производство энергии (ТЭС и АЭС)

Влияние климата на производство энергии, вырабатываемой на ископаемом топливе, в основном связано с эффективностью цикла генерации, требованиями к системам безопасности, включая охлаждение энергоблоков и условия рассеивания примесей. От совершенства системы охлаждения зависит величина удельных расходов топлива и выбросов вредных газов CO_2 , NO_x , SO_2 в окружающую среду. Чем ниже температура охлаждающей воды, тем меньше расход топлива и выбросы в атмосферу. Системы охлаждения энергоблоков электростанций делают функционирование АЭС и ТЭС в значительной степени зависимым как от температуры и влажности наружного воздуха, так и от наличия и температуры охлаждающей воды. Колебания температуры воздуха оказывают заметное влияние на эффективность работы газотурбинных установок. Так, рост температуры воздуха на 5°C уменьшает выработку энергии на 2–4 % (Aivalioti, 2015). Особо следует отметить негативное влияние на выработку энергии изменения повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений (смерчей, ливней, экстремальных температур и скоростей ветра и т. д.), способных не только нанести ущерб агрегатам электростанций, но и подвергнуть опасности окружающие населенные пункты (Ebinger, Vergara, 2011). В связи с этим в нормативных документах по строительству объектов атомной и тепловой энергетики большое внимание уделяется климатическим характеристикам температурного, ветрового режима и режима увлажнения в районах расположения электростанций.

Одним из ключевых показателей эксплуатации генерирующих мощностей является эффективность работы электростанций, которая характеризуется коэффициентом использования установленной мощности. Этот показатель зависит от технических характеристик энергоблоков, а также от условий окружающей среды (температура воздуха и воды, давление, влажность) и оптимальности выбора системы охлаждения. Рост температуры повышает удельный объем потребления воздуха и энергии в компрессоре и уменьшает генерацию вырабатываемой энергии. Это вызвано тем, что высокая температура

воздуха обуславливает более низкое атмосферное давление и снижает эффективность сжигания топлива из-за недостаточной концентрации кислорода. Имеющиеся данные по связи температуры воздуха с мощностью свидетельствуют, что при достижении критической температуры мощность выработки начинает резко снижаться (Steininger et al., 2015; Totschnig et al., 2017). Приведенные в работе В. А. Калатузова (2014) расчеты зависимости располагаемой мощности ТЭС от температуры наружного воздуха для градирен Липецкой, Ереванской и Артемовской ТЭС (рис. 1) показали, что эта связь не зависит от климатических условий.

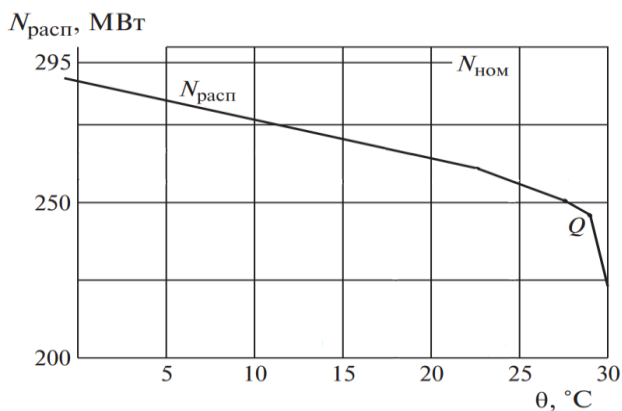


Рис. 1. Зависимость располагаемой мощности ТЭС ($N_{расп}$, МВт) от температуры воздуха (Калатузов, 2014)

Важной проблемой также является наличие достаточного количества и качества воды, используемой в большинстве систем охлаждения агрегатов электростанций, что делает их крайне уязвимыми в условиях ограниченности водных ресурсов и конкуренции с другими водопользователями.

С изменением климата генерация на основе угля будет связана с необходимостью улавливания и хранения двуокси углерода, что увеличит спрос на воду для его очистки и сжатия. В результате для электростанции мощностью 550 МВт потребуется дополнительно 125 МВт мощности для улавливания и хранения углекислого газа.

Кроме того, повышение температуры воздуха может также повысить температуру воды и отрицательно повлиять на эффективность охлаждения установки.

Изменения в доступности воды могут иметь негативные последствия для строительства новых и эксплуатации уже существующих энергоустановок, которые будут все в большей степени конкурировать с другими водопользователями (сельское хозяйство, ЖКХ, предприятия обрабатывающей промышленности и т. д.). В связи с этим выбор местоположения новых электростанций должен быть тщательно проанализирован при принятии решений об их строительстве.

Примером воздействия изменений температурного режима на работу тепловых и атомных электростанций явилась критическая ситуация в области производства электроэнергии на АЭС и ТЭС, сложившаяся аномально жарким летом 2010 г. на Европейской территории России. В условиях длительной экстремальной жары, когда высокие температуры наружного воздуха держались не только в дневные, но и в ночные часы, росла температура циркуляционной воды на входе в конденсаторы турбин — до 35–38, а по некоторым ТЭЦ — до 40 °С. Из-за жары и засухи в этот период гидроэлектростанции Волжско-Камского каскада, вырабатывающие значительную долю электричества в Европейской части России, работали не на полную мощность, что еще больше увеличило нагрузку на атомные и тепловые электростанции. В результате на ряде АЭС произошли аварийные остановки энергоблоков. Температурные условия в этот период в районах расположения АЭС и их сравнение со средними показателями второй половины XX в. приведены в таблице 1, из которой видно, что в период аварийных остановок энергоблоков сложились экстремальные погодные условия. Так, температура наиболее жаркой пятидневки, являющаяся важным показателем температурного режима для систем охлаждения, превысила эту характеристику относительно периода 1961–1990 гг. на 5–10 °С.

Таблица 1

Температура воздуха в районах расположения АЭС в периоды аварийных остановок энергоблоков

АЭС	Дата остановки 2010 г.	Метео- станция	Т _{ср.} пятидневки						Т, °С, с обеспеченностью	
			Т _{max}	Т _{min}	Т _{ср}	Т _{max}	Т _{min}	Т _{ср}	0,92	0,98
			<i>до аварии</i>			<i>среднее за 1961–1990 гг.</i>				
Калининская	05.08	Тверь	30,6	17,0	23,8	22,7	11,5	17,1	21	25
ЛАЭС	07.08	Санкт-	28,8	19,1	23,9	22,5	14,7	18,6	22	25
	16.08	Петербург	28,3	19,0	23,7	19,8	12,7	16,3	22	25
Нововоронежская	04.08	Воронеж	38,4	19,8	29,1	25,0	13,9	19,4	25	29
Курская	22.07	Курск	35,3	22,9	29,1	24,1	14,2	19,1	23	27

Анализ причин аварийных остановок показал, что к критической ситуации привели не только аномальные погодные условия, но и некоторые действия обслуживающего персонала АЭС, который не имел опыта работы в условиях экстремальной жары.

Исследование (Акентьева, Тюсов, 2015; Тюсов и др., 2017) по оценке погодно-климатических рисков для функционирования АЭС и ТЭС в районах России с наиболее высокой плотностью расположения объектов энергетики (рис. 2) с использованием данных о продолжительности и повторяемости волн тепла в 1961–2020 гг. показало, что наибольшие риски для систем охлаждения АЭС и ТЭС наблюдались в Центрально-Черноземном районе, где отмечены наибольшие значимые положительные тренды как продолжительности волн тепла, так и засушливых периодов (волна тепла — период не менее трех последовательных суток с минимальной и максимальной температурой воздуха выше 90 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки; засушливый период — число последовательных дней с осадками менее 1 мм).

В зоне повышенных рисков находились также Ростовская и Свердловская области, где отмечалось увеличение повторяемости и длительности тепловых волн. Однако, в отличие от Ростовской, длительность засушливых периодов в Свердловской области имеет тенденцию к сокращению. Наименьшие риски для систем охлаждения электростанций отмечались для Калининградской области, на территории которой практически отсутствовали изменения указанных показателей.

Согласно оценке изменений длительности тепловых волн и засушливых периодов к середине XXI в., полученных по данным региональной модели ГГО (Shkolnik et al., 2017), отношение сигнала к шуму для изменений продолжительности самой длинной волны тепла оказывается больше единицы для всех рассматриваемых районов. Наибольшего роста величины этой характеристики следует ожидать в Ростовской области и Центрально-Черноземном регионе. Прогнозные значения числа жарких периодов во всех семи указанных на рисунке 2 районах значительно превышают величины, наблюдаемые в конце XX в. (если в конце XX в. экстремально жаркие

периоды наблюдались один раз в 5–10 лет, то к середине XXI в. они могут отмечаться практически ежегодно).

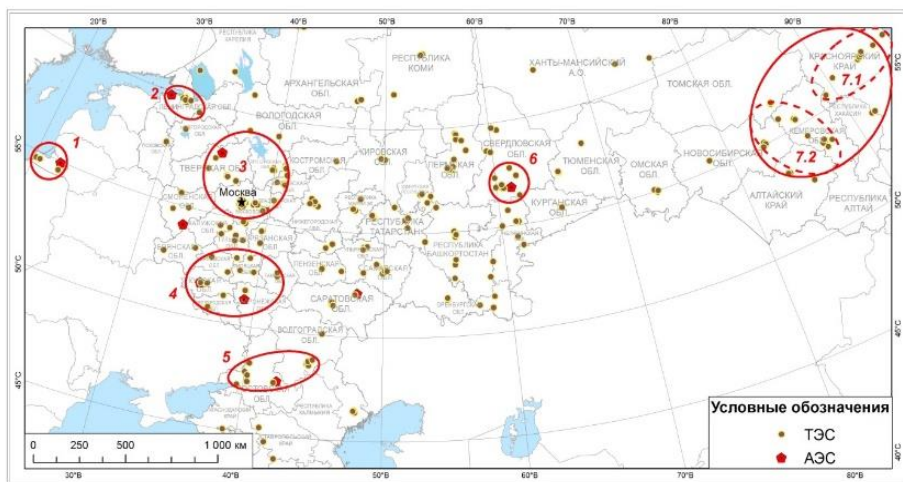


Рис. 2. Территории РФ с высокой плотностью расположения ТЭС и АЭС: 1 – Калининградская область; 2 – Санкт-Петербург и Ленинградская область; 3 – Центральный регион; 4 – Центрально-Черноземный регион; 5 – Ростовская область; 6 – Свердловская область; 7 – Южно-Сибирский регион

Таким образом, на основании совместного анализа наблюдаемых и ожидаемых изменений указанных индексов можно сделать вывод о том, что во всех рассматриваемых районах к середине XXI в. следует ожидать практически двукратного увеличения максимальной длительности волн тепла и возрастания в 4–5 раз повторяемости лет с экстремально жаркими периодами. При этом в зоне наибольшего риска окажутся Центрально-Черноземный регион и Ростовская область. Надо отметить, что в этих районах риски бесперебойной работы систем охлаждения энергоблоков электростанций, связанные с высокими температурами воздуха и охлаждающей воды, становятся еще более значимыми из-за увеличения потребления энергии на кондиционирование в летний период. Следовательно, именно

в этих двух районах в первую очередь необходимо повысить надежность систем охлаждения агрегатов АЭС и ТЭС.

На всей территории страны к середине века ожидается увеличение частоты сухих периодов и периодов с аномально высокими температурами (Катцов и др., 2020). В зоне наибольших рисков окажется Европейская часть России и юг Западной Сибири, т. е. районы с наиболее развитой энергетической инфраструктурой. В этой ситуации для повышения надежности и эффективности работы АЭС и ТЭС становится особенно необходимым комплексный подход к адаптации, включающий технологические, поведенческие и институциональные меры.

Возобновляемые источники энергии

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются ключевыми компонентами климатической политики России. Их развитие рассматривается, главным образом, в качестве меры по предотвращению климатических изменений и охраны окружающей среды, поскольку это одна из основных, наиболее безопасных и экономически выгодных альтернатив ископаемому топливу для реализации целей сокращения выбросов парниковых газов в секторе энергетики (Ермоленко и др., 2017).

Благодаря высоким темпам роста генерации на основе возобновляемых источников энергии в мире происходит снижение доли ископаемого топлива (каменного угля, нефти и природного газа) в общей структуре выработки электроэнергии (рис. 3а).

По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), к 2021 г. мировая возобновляемая мощность составила 2 799 ГВт. Вклад различных видов источников в общую мощность генерации иллюстрирует рисунок 3б. Основными преимуществами возобновляемых источников электроэнергии являются:

– отсутствие выбросов в атмосферу, которые имеют место при работе генерирующих установок электростанций на углеводородном топливе;

- возможность повсеместного использования ВИЭ, в том числе для личного использования;
- уменьшение потерь при передаче электроэнергии от производителя к конечному потребителю;
- уменьшение зависимости от централизованного электроснабжения и, как следствие, повышение надежности электроснабжения;
- возможность электрификации труднодоступных районов, куда подведение централизованного электроснабжения невозможно или экономически невыгодно.

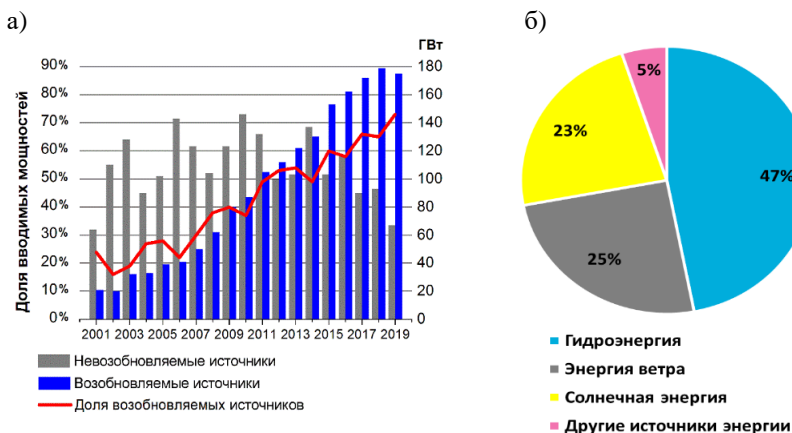


Рис. 3. Показатели возобновляемых источников энергии в мире (IRENA, 2020): а) динамика годового объема энергоресурсов в общей структуре выработки энергии; б) возобновляемые источники энергии по видам

К недостаткам ВИЭ относятся:

- отсутствие постоянной выработки электроэнергии, так как выработка электроэнергии всецело зависит от погодных условий;
- невозможность генерировать электроэнергию ночью при использовании солнечных панелей или в безветренную погоду при использовании ветрогенераторов;
- малый коэффициент полезного действия.

Несмотря на доминирование в России традиционной энергетики, в последние годы ситуация стала заметно меняться, но суммарный вклад ВИЭ в энергетический баланс России остается недоиспользованным и по экспертным оценкам не превышает 1 %. Долю ВИЭ в российском энергобалансе предполагается увеличить до 4 % к 2035 г. (Энергетическая стратегия России..., 2020). Согласно базовому сценарию (IRENA, 2017), прогнозируется двукратный рост общего использования возобновляемой энергии с 0,6 ЭДж в 2010 г. до 1,1 ЭДж в 2030 г. Это потребление будет эквивалентно 5 % от общего спроса страны на энергию в 2030 г.

Выполненные рядом авторов оценки свидетельствуют о большом потенциале возобновляемых источников энергии в России (табл. 2) (Shepvalova, 2015; Атлас ресурсов..., 2015; Ермоленко и др., 2017).

Таблица 2

Оценка потенциала возобновляемых источников энергии в России (млн т.у.т.) (Shepvalova, 2015)

Возобновляемый ресурс	Теоретический потенциал	Технический потенциал		Экономический потенциал	
		2010 г.	2020 г.	2010 г.	2020 г.
Солнечная энергия	2 205 400	9 695	29 900	63	180
Энергия ветра	44 326	2 216	3 324	11	18
Малая гидроэнергия	402	120	160	70	91
Биомасса	467	129	170	69	89
Геотермальная энергия	29 200	11 869	1 300	114	125
Низко-потенциальное тепло Земли	563	194	220	53	70
Итого по ВИЭ	2 251 158	24 229	35 074	320	572

В настоящее время российский Гринпис по данным открытых источников выпустил интерактивную карту возобновляемых источников энергии в России (<https://www.greenpeace.ru/news/2022/02/22/grinpis-zapustil-interaktivnuju-kartu-vozobnovljaemyh-istochnikov-jenergii-v-rossii/>), на которой собрал действующие

солнечные, ветровые, геотермальные электростанции, а также биогазовые станции и малые ГЭС — всего более 200 объектов. Карта показывает установленную мощность каждого объекта и год введения его в эксплуатацию. В карту не вошли крупные плотинные ГЭС, поскольку их строительство и эксплуатация негативно влияют на биоразнообразие, экологическое состояние рек и зачастую связано с необходимостью затопления масштабных территорий.

Тенденцию роста выработки электроэнергии с помощью ВИЭ по данным Министерства энергетики РФ иллюстрирует рисунок 4.

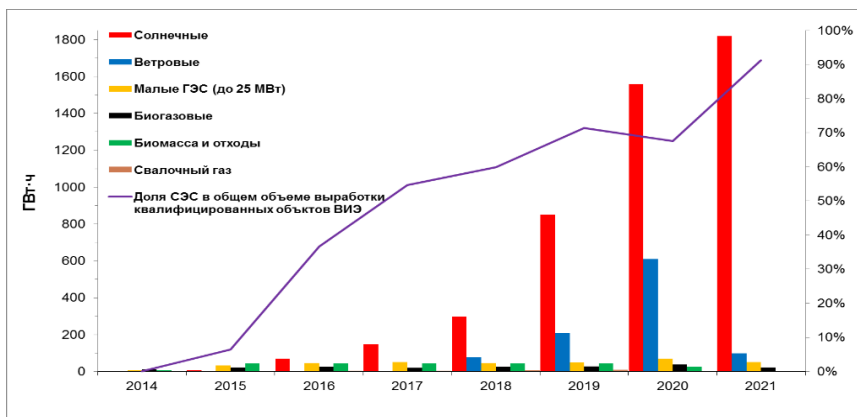


Рис. 4. Объем выработки электроэнергии на квалифицированных объектах ВИЭ, подтвержденный сертификатами (Министерство энергетики РФ, Ассоциация НП Совет Рынка)

Природный потенциал ВИЭ в России

Вся южная часть России обладает высокими солнечными ресурсами, которые могут быть использованы для выработки электрической и тепловой энергии. Годовая продолжительность солнечного сияния в этих районах составляет 2000–2600 ч. В июле в северных районах Восточной Сибири и на юге Европейской части России максимальная продолжительность солнечного сияния составляет более 320 ч, это 50–70 % от возможной

продолжительности. При этом средняя продолжительность солнечного сияния в день с солнцем в этих районах 10–11 ч.

Годовая суммарная солнечная радиация, приходящая на земную поверхность, в южных районах более 1100 кВт·ч/м². Особо следует отметить высокий солнечный потенциал Якутии, где, например, в апреле и мае месячные суммы суммарной солнечной радиации в ее северных районах так же высоки, как на северном Кавказе и в Астраханской области, — более 165 кВт·ч/м² (600 МДж/м²). Карты распределения продолжительности солнечного сияния и суммарной солнечной радиации по территории России приведены в (Климатические факторы..., 2010; ОД2, 2014).

Исходя из количества и структуры поступающей радиации, наиболее перспективными для гелиоэнергетики являются Приморский край, южная часть Хабаровского края и Амурской области, юго-восток Забайкалья и южная часть Европейской территории России. Коэффициент использования установленной мощности солнечной генерации в этих районах может превышать 17 %. Это сопоставимо с эффективными французскими, итальянскими или испанскими проектами. Характеристика природного гелиопотенциала регионов России приведена в (Климатические факторы..., 2010).

Россия занимает первое место в мире по ветроэнергетическому потенциалу. На многих территориях имеются достаточные ресурсы для эффективного развития ветроэнергетики, позволяющие электростанциям работать с годовым коэффициентом использования установленной мощности, превышающим 30 % (IRENA, 2020). Для сравнения: в странах-лидерах ветроэнергетики (Китае и Германии) он составляет 21,3 и 20,6 % соответственно. Энергия ветра, которая может быть использована системой ветроэнергетических установок, характеризуется средней годовой удельной мощностью ветрового потока. Эффективность работы ветроэнергетических установок напрямую зависит от средней скорости ветра.

Наибольшим ветроэнергетическим потенциалом в России обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей, где средние скорости на высоте 10 м над уровнем подстилающей поверхности составляют 7–8 м/с, а на высоте 100 м

(высота оси роторной системы у современных ВЭУ) — 10–12 м/с. На Европейской территории России перспективными для развертывания системной ветроэнергетики являются районы мелководья Финского залива к югу от о. Котлин, прибрежные части акватории Ладоги, где средняя годовая скорость ветра на высоте 10 м находится в пределах 6–8 м/с. Другими перспективными являются районы мелководной акватории Азовского моря вблизи Керченского пролива, предгорья Северного Кавказа, прибрежная часть Каспия, междуречье Волги и Дона. На Азиатской территории перспективными для ветроэнергетики являются южная часть Приморского края, особенно прибрежная зона залива Петра Великого, где на уровне 10 м средняя годовая скорость ветра около 7–8 м/с, а на высоте 100 м — 9–11 м/с. Очень велики ветроэнергетические ресурсы на пологих склонах невысоких горных массивов Южного Урала, там средняя годовая скорость ветра составляет 7–10 м/с, а на высоте 100 м — 12–13 м/с. Как отмечено в ОД2 (2014), в последние 20 лет XX в. в России повторяемость «энергоактивных» скоростей ветра (≥ 5 м/с), при которых происходит выработка основной доли энергии ветровыми установками, мало изменилась по сравнению с предшествующими десятилетиями.

Кроме солнечных и ветровых ресурсов в России имеются большие запасы энергии *биомассы*. Органическая биомасса признана одним из наиболее перспективных возобновляемых источников для удовлетворения потребности в электрической и тепловой энергии. Кроме того, она способствует значительному снижению экологической напряженности.

В отличие от других ВИЭ энергия биомассы может быть преобразована в жидкое топливо (биотопливо) и использована для транспортных нужд. Сырьем для биотоплива являются отходы сельского и лесного хозяйства, органические отходы, посадки леса с коротким оборотом рубки, посадки злаков и бобовых культур, предназначенные для энергетических целей.

Ежегодно в России по разным отраслям народного хозяйства производится до 300 млн т отходов биомассы (по сухому веществу). Энергетический потенциал указанного количества отходов составляет

190 млн т.у.т. Переработка такого количества отходов только по биогазовым технологиям может дать до 80 млрд м³ биогаза, что эквивалентно 56 млрд м³ природного газа (ОД2, 2014).

Максимальным суммарным энергетическим потенциалом биомассы обладают Иркутская область, юг Красноярского края, Вологодская, Архангельская, Кировская, Ленинградская области, Пермский край, Республика Коми.

Геотермальная энергия представляет собой естественное тепло планеты. Энергетические установки на основе тепла земли (ГеоТЭС) используют высокую температуру воды или пароводяной смеси. По данным IRENA по состоянию на 2018 г., в мире работало 22 петротермальных электростанции, большая часть которых сосредоточена в Европе. Установленная мощность геотермальных электростанций в мире составила 13 329 МВт, в России — 74 МВт (Максимов, 2019).

В России введены в эксплуатацию Паужетская (18 МВт), Верхне-Мутновская (12 МВт), полностью автоматизированная Мутновская ГеоТЭС (50 МВт) и две ГеоТЭС на Курильских островах.

Большие запасы подземных термальных вод находятся на Камчатке и Курильских островах, в Западно-Сибирском нефтегазоводоносном бассейне, в Дагестане, Чечне, Ингушетии, Северной Осетии, Ставропольском и Краснодарском краях.

В последнее время широкое распространение получило использование низкопотенциального тепла земли на базе тепловых насосов, которые могут применяться в различных типах зданий и сооружений для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования (охлаждения) воздуха и др. (ОД2, 2014).

Потенциал возобновляемых источников энергии в России в условиях изменения климата

Вопросу чувствительности возобновляемых источников к изменению климата посвящено много исследований. Во многих работах отмечается, что изменение ресурсного потенциала солнечной, ветровой и биоэнергии будет носить преимущественно региональный

характер, а на объем и географическое распределение геотермальных и океанических энергетических ресурсов изменение климата не окажет значительного воздействия (Клименко и др., 2019; Carvalho et al., 2017; Jerez et al., 2015; Peters, Buonassisi, 2019; Wild et al., 2015).

Оценки потенциала ветроэнергетических и лесных ресурсов на период до 2070 г. (Клименко и др., 2019), выполненные по климатическим моделям CMIP5 в условиях сценария RCP 4.5, показали изменение скорости ветра в пределах от -15 до $+10$ % на территории России ко второй половине XXI в. по сравнению с началом столетия. Увеличение средней скорости ветра прогнозируется на юге Дальнего Востока, что будет способствовать повышению выработки энергии до $10-15$ %. Авторы не делают однозначного вывода об изменении скорости ветра на Чукотке и Камчатке, где предпринимаются попытки использовать ветроустановки в составе местных изолированных энергосистем, в связи с большим разбросом в модельных оценках. Полученные в цитируемой работе результаты достаточно хорошо согласуются с оценками по ансамблю 25 МОЦАО CMIP5, приведенными в ОД2 (2014). Существенное различие отмечается в прибрежных северных районах Европейской части страны, особенно в районе Кольского полуострова, где, согласно (ОД2, 2014), прогнозируется не уменьшение, а заметный рост приземной скорости ветра.

Существующие прогнозные оценки изменения ветрового режима отличаются некоторой противоречивостью и большой неопределенностью. Это связано с малыми изменениями скорости ветра по сравнению с естественной изменчивостью и большим межмодельным разбросом (Bloom et al., 2008; Breslow, Sailor, 2002; Jerez et al., 2015; Школьник и др., 2014).

Расчет изменений доступных древесных ресурсов, пригодных для энергетического использования, вызванных повышением биопродуктивности лесов за счет увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и изменения климатических условий, показал увеличение энергетических ресурсов древесного топлива к середине столетия до 9 млн т.у.т., что по абсолютной величине значительно превышает климатические эффекты для других отраслей энергетики.

В связи с интенсивным развитием солнечной энергетики вопросы влияния изменения климата на выработку солнечных электростанций обсуждаются во многих работах (Peters, Buonassisi, 2019; Jerez et al., 2015; Feron et al., 2021; Wild et al., 2015).

Большое внимание уделяется исследованию возможных негативных последствий повышения глобальной температуры для работы кремниевых солнечных батарей, которые могут потерять в среднем около 0,45 % своей мощности на каждый градус глобального повышения температуры (Peters, Buonassisi, 2019).

Глобальное потепление повлияет на разные солнечные модули по-разному. Некоторые солнечные батареи более устойчивы к высоким температурам, поскольку у них низкий температурный коэффициент максимальной выходной мощности. Полученные результаты указывают на необходимость исследований по снижению зависимости производительности фотоэлементов от температуры окружающей среды.

Оценка изменений выработки солнечной энергии в ближайшие десятилетия на основе прогнозируемых с помощью глобальных климатических моделей CMIP5 изменений солнечной радиации в сочетании с изменением температуры показала, что увеличение поступающей солнечной радиации компенсирует влияние температуры, и изменение климата вряд ли негативно скажется на развитии фотоэлектрических систем в Европе (Jerez et al., 2015).

Энергетическая отдача фотоэлектрических модулей в первую очередь зависит от доступного количества солнечных ресурсов (количества солнечной радиации, поступающей на гелиоприемник). Согласно прогнозам долгосрочных изменений солнечной радиации на основе климатических моделей CMIP5 (Wild et al., 2015) сделан качественный вывод о возможном снижении производства фотоэлектрической энергии во многих районах мира в ближайшие десятилетия в результате глобального потепления и уменьшения солнечной радиации. Положительные тенденции будут отмечаться только в тех регионах, где облачный покров существенно уменьшается и радиация в условиях ясного неба увеличивается. Это будет характерно для большей части Европы и юго-востока Китая.

В России, согласно модельному прогнозу СМIP6 в условиях сценария *ssp 4.5* в периоды 2021–2040 (рис. 5а), 2041–2060 (рис. 5б) и 2080–2099 гг. (рис. 5в) (Катцов и др., 2022), ожидается рост годовой суммарной солнечной радиации по отношению к базовому периоду 1991–2010 гг. на Европейской территории страны и южной части Азиатской территории. В конце столетия максимальные значения положительной аномалии в отдельных районах Европейской территории и Западной Сибири могут достигать 6 %. Интенсивность положительной аномалии будет снижаться в восточном направлении до 0–2 %.

Вся северная половина Азиатской территории России в XXI в. будет находиться в зоне слабой отрицательной аномалии, не более 2 %, в крайних северных прибрежных районах снижение годовых сумм суммарной радиации будет более заметным — до 4 %. В конце столетия в отдельных районах центральной части Азиатской территории (преимущественно в Якутии) отрицательная аномалия сменится на слабую положительную.

В течение XXI в. ожидается формирование обширных сезонных аномалий противоположного знака: летних положительных и зимних отрицательных, интенсивность которых в конце века значительно возрастет. Суммарная радиация за летний сезон в 2080–2099 гг. на Азиатской территории будет выше на 4 %, а на Европейской — на 6–8 % по отношению к периоду 1991–2010 гг. Снижение прихода радиации в зимний сезон на большей части территории РФ достигнет 4 %, а на крайнем северо-востоке страны и в отдельных южных районах Европейской территории — 6 %.

В настоящее время и в близкой перспективе в России наиболее реальным направлением практического использования солнечной энергии является теплоснабжение. В ОД2 (2014) было отмечено, что влияние изменений солнечной радиации и температуры воздуха положительно скажется на выработке тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами. Тенденция к увеличению выработки тепловой энергии подтверждается уточненными расчетами поступления солнечной радиации в соответствии со СМIP6.

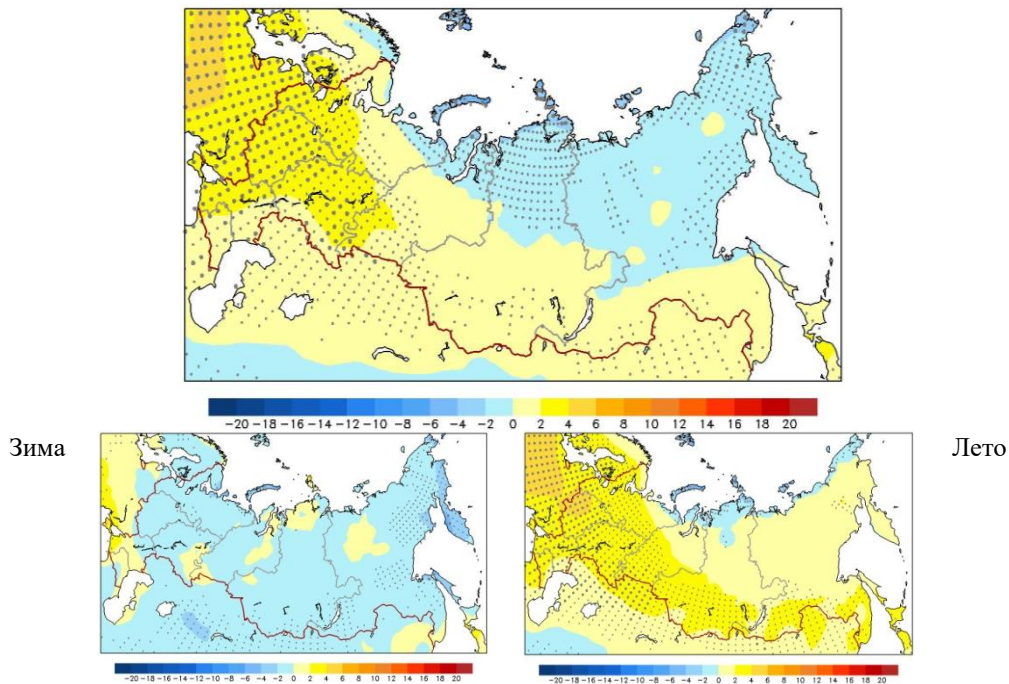


Рис. 5а. Изменения, %, годового и сезонных потоков суммарной солнечной радиации, рассчитанные по ансамблю AN_35 в условиях сценария ssp 4.5 для 2021–2040 гг. по отношению к базовому периоду 1991–2010 гг.

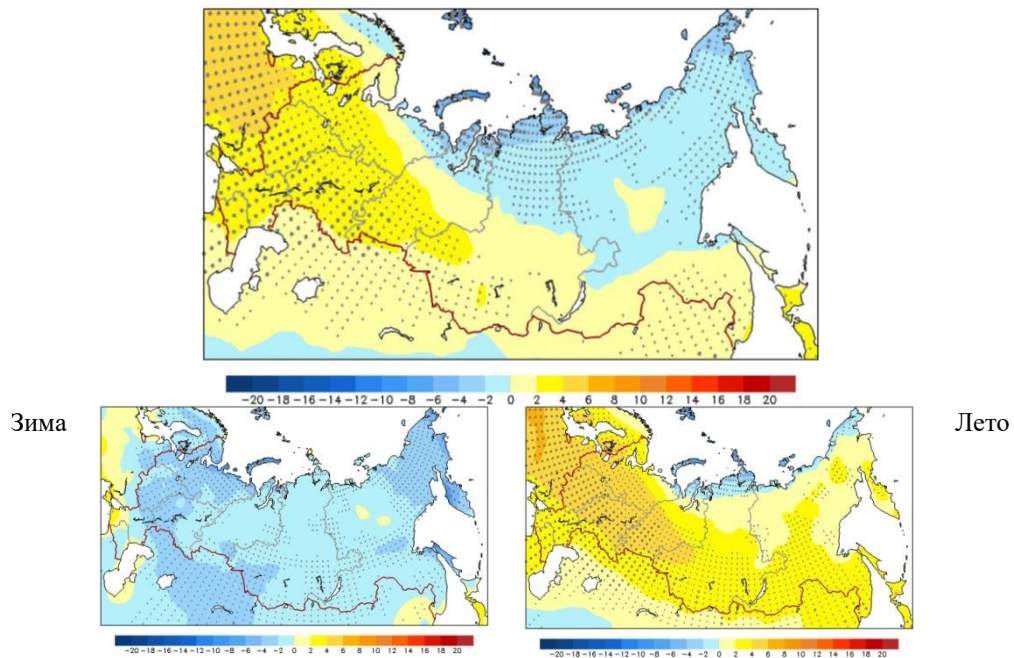


Рис. 5б. Изменения, %, годового и сезонных потоков суммарной солнечной радиации, рассчитанные по ансамблю AN_35 в условиях сценария ssp 4.5 для 2041–2060 гг. по отношению к базовому периоду 1991–2010 гг.

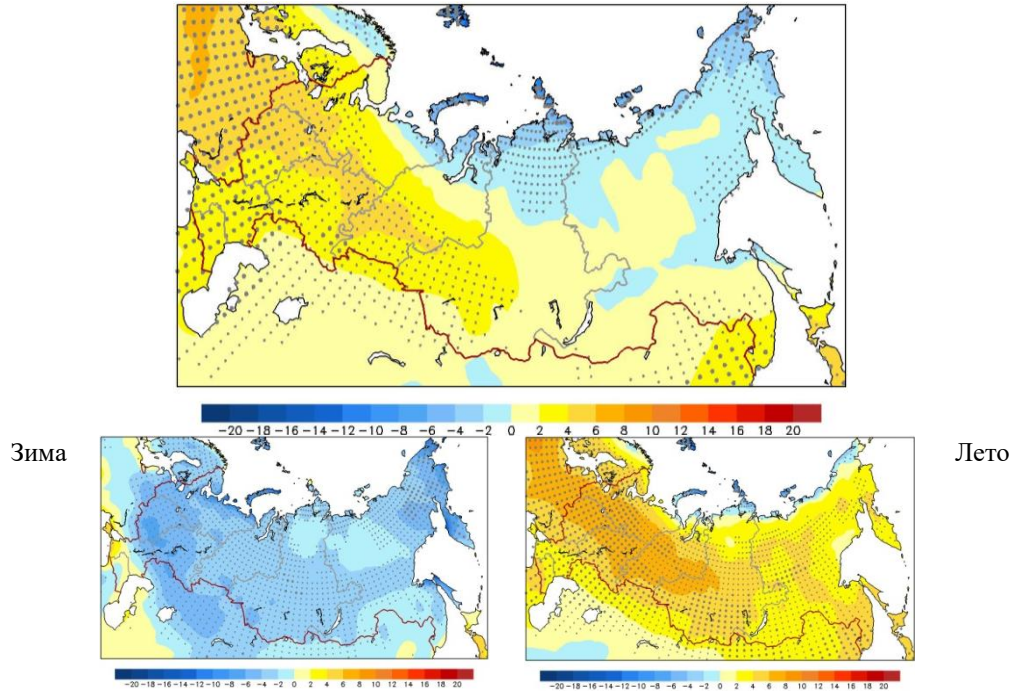


Рис. 5в. Изменения, %, годового и сезонных потоков суммарной солнечной радиации, рассчитанные по ансамблю AN_35 в условиях сценария ssp 4.5 для 2080–2099 гг. по отношению к базовому периоду 1991–2010 гг.

Как видно из рисунка 6, в течение всех трех рассмотренных периодов изменение эффективности выработки энергии тепловыми коллекторами будет происходить, главным образом, в соответствии с изменением поступающей на приемную поверхность солнечной радиации — уменьшением ее по территории страны в восточном направлении. В период 2021–2040 гг. возможно увеличение удельной выработки в южных районах Европейской территории России и в Западной Сибири (до 40–60 кВт·ч/м²).

К середине XXI столетия и особенно к его концу, согласно модельному прогнозу, рост температуры будет более интенсивным, что положительно скажется на работе солнечных коллекторов даже в северо-восточных районах Азиатской территории, где рост температуры перекроет прогнозируемое уменьшение солнечной радиации, и использование солнечных коллекторов в режиме горячего водоснабжения может стать рентабельным.

В западных и южных районах Европейской части России, на юге Западной Сибири производительность работы солнечного коллектора увеличится на 60–80 кВт·ч с каждого квадратного метра установки. К концу века в южных районах Центрального и Приволжского ФО, в Южном и Северо-Кавказском ФО в соответствии с ростом температуры в сочетании с повышенным приходом солнечной радиации производительность работы солнечных коллекторов может возрасти на 100 кВт·ч с каждого квадратного метра установки.

Приведенные оценки возможных изменений не учитывают прогресса в технологии приемных поверхностей.

Расширение масштабов использования экологически чистых, но дорогих фотоэлектрических станций в наземных условиях связано с необходимостью их рационального проектирования. На начальном этапе разработок целесообразность и эффективность применения фотоэлектрического способа получения электроэнергии в данной местности характеризуется удельной годовой выработкой электрической энергии, определяемой количеством солнечной радиации, поступающей на гелиоприемник, и теплофизическими характеристиками фотоэлектрического генератора.

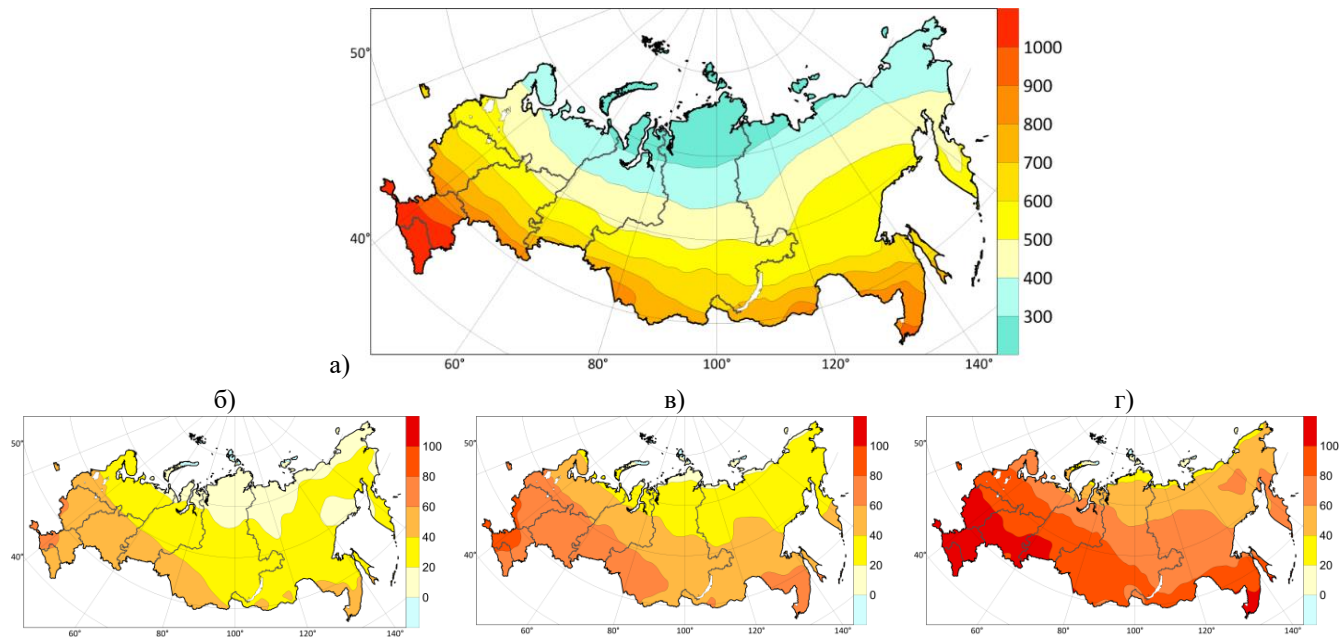


Рис. 6. Удельная годовая выработка тепловой энергии, кВт·ч/м², плоским солнечным коллектором за базовый период 1991–2010 гг. (а) и ее изменения для периодов 2021–2040 (б), 2041–2060 (в) и 2080–2099 (г) по отношению к базовому периоду, рассчитанные по ансамблю моделей СМIP6 в условиях сценария ssp 4.5

На рисунке 7 приведена карта удельной годовой выработки электрической энергии фотогенератором с углом наклона, оптимальным для года, и КПД 15 % и ее изменения в 2021–2040, 2041–2060, 2080–2099 гг., из которой видно, что выработка электрической энергии зависит главным образом от доступного количества солнечных ресурсов. В течение всего столетия выработка электрической энергии будет находиться в соответствии с изменением годовой приходящей солнечной радиации (рис. 5). Рост годовой суммарной солнечной радиации по отношению к базовому периоду 1991–2010 гг. на Европейской территории страны и южной части Азиатской территории будет способствовать увеличению удельной годовой выработки электрической энергии на 4–6 кВт·ч/м².

Уменьшение годового прихода солнечной радиации на Азиатской территории приведет к снижению удельной выработки, особенно в конце столетия, до 10–12 кВт·ч с квадратного метра фотогенератора.

Влияние происходящих изменений климата в связи с повышением температуры воздуха, увеличением количества осадков, повторяемости экстремальных явлений на ресурсный потенциал биомассы изучены недостаточно, и, вероятно, оно в разных регионах будет различным. Воздействие изменения климата на биомассу существует, но если глобальное повышение температуры не превысит 2 °С по сравнению с доиндустриальными наблюдениями, это воздействие будет ограничено (IPCC 2011).

На общий потенциал геотермальных ресурсов и эффективность использования геотермальной энергии изменение климата не будет иметь каких-либо серьезных воздействий (IPCC 2011). Однако на местном уровне изменения климата, особенно распределение осадков, может оказать влияние на уровень воды в неглубоких геотермально нагреваемых водоносных горизонтах. Кроме того, доступность воды для охлаждения зависит от прихода поверхностных вод и который определяется количеством осадков, что вызовет потребность в промышленных конденсатных установках с воздушным охлаждением. Влияние этих факторов при условии их реализации может быть исправлено с помощью внесения корректив в технологию при проектировании ГеоГЭС.

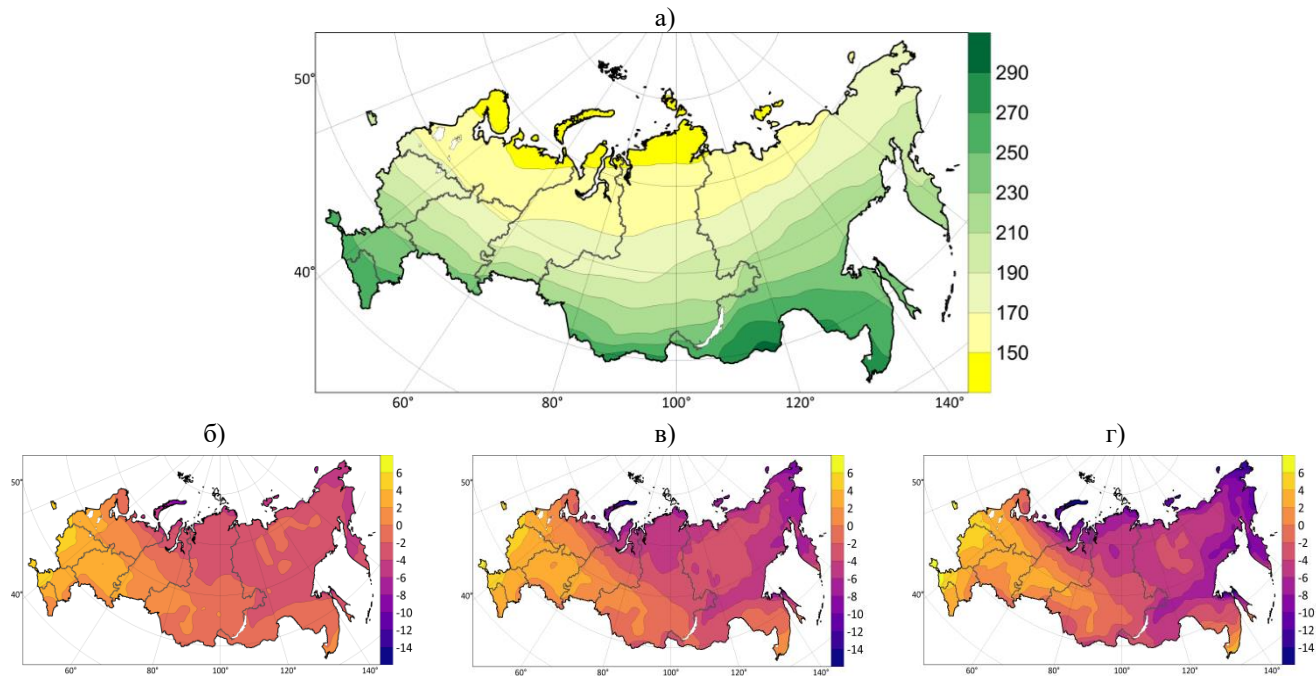


Рис. 7. Удельная годовая выработка электрической энергии, кВт·ч/м², фотогенератором при КПД 15 % за базовый период 1991–2010 гг. (а) и ее изменения для периодов 2021–2040 (б), 2041–2060 (в), 2080–2099 (г) по отношению к базовому периоду, рассчитанные по ансамблю моделей СМIP6 в условиях сценария ssp 4.5

Следует отметить, что влияние ВИЭ на глобальный климат можно считать минимальным. Даже с учетом всего жизненного цикла — добычи сырья, производства компонентов, строительных и монтажных работ — получение электроэнергии от ВИЭ сопровождается выбросами CO₂ в атмосферу в 10–20 раз меньшими, чем при ее производстве из угля и газа. По мере развития технологий «углеродный след» от ВИЭ снижается. Однако более важной проблемой является «экологический след» от оборудования и компонентов солнечных и ветровых электростанций. Отрасль бурно развивается, объемы производства быстро растут, а сами производственные мощности «мигрируют» из Европы и США в страны с менее строгой экологической политикой. Кремний, металлы платиновой группы, алюминий, сталь — все эти и другие необходимые для ВИЭ материалы добываются и обрабатываются с ущербом для окружающей среды. Задача мирового сообщества — управлять этими рисками, как того и требует концепция устойчивого развития ООН.

Передача энергии (ЛЭП)

В нашей стране сложилась преобладающая модель электроснабжения — электроэнергия производится на крупных электростанциях, передается на большие расстояния по линиям электропередачи и доводится до потребителей через понижающие подстанции и распределительные сети.

Линии электропередачи (ЛЭП) являются частью электрической сети. Различают воздушные и кабельные ЛЭП. Наиболее распространены воздушные линии (ВЛ), прокладка которых происходит на открытом воздухе, так как по сравнению с кабельными линиями они экономически более выгодны. ВЛ особенно подвержены влиянию климатических воздействий из-за их территориальной протяженности. Согласно данным АО «СО ЕЭС» на 1 января 2021 г., сетевое хозяйство Единой энергетической системы (ЕЭС) России насчитывает более 13 000 линий электропередачи класса напряжения 110–1150 кВ общей протяженностью более 490 тыс. км и более 10 000

электрических подстанций 110–750 кВ. Из-за большой протяженности ЛЭП их подверженность неблагоприятным погодным воздействиям очень велика. Ливень со снегом, ураганный ветер, перепады температуры создают риски технологических нарушений в электросетевом распределительном комплексе (Доклад..., 2017).

Аварии на ЛЭП приводят к большим экономическим потерям. В густонаселенных районах это может затронуть большое количество людей, а в изолированных и труднодоступных энергорайонах (Чукотский АО, Камчатская, Сахалинская и Магаданская области, центральная и северная части Якутии) последствия аварий для населения могут быть тяжелее, поскольку их устранение затруднительно.

В основе бесперебойного функционирования воздушных линий лежат климатические особенности района, в котором они эксплуатируются. При проектировании линий электропередач учитываются следующие климатические факторы:

- гололедная нагрузка;
- ветровая нагрузка;
- грозовая деятельность;
- температурные воздействия.

От величины климатических нагрузок зависит тип проектируемой линии электропередачи (длина пролета, тип опор, вид провода и пр.), их недоучет может привести к аварийным ситуациям.

В последние десятилетия на территории Российской Федерации и за рубежом увеличилось количество аварий в электрических сетях, которые были вызваны климатическими воздействиями (OSCE, 2016). Это связано с изменениями климата, выражающимися в росте температуры, увеличении повторяемости ОЯ и занормативных климатических нагрузок. Ярким примером может послужить авария на сети, произошедшая в Приморском крае в ноябре 2020 г. Пришедший циклон вызвал сильный снегопад, ледяной дождь и сильный ветер. В результате на линиях электропередач возникла дополнительная гололедно-ветровая нагрузка, которая привела к обрывам проводов, разрушениям опор ЛЭП, и больше 100 тысяч жителей Приморского края остались без электроснабжения.

Повреждения воздушных линий, вызванные климатическими воздействиями, составляют порядка 40 % от общего количества случаев (Доронина и др., 2015). При этом гололедные и ветровые нагрузки являются причинами наиболее серьезных и трудноустраняемых неполадок, так как они носят не точечный характер, а воздействуют на протяженные участки воздушных линий (такие аварии могут ликвидироваться в течение нескольких дней). Гололедно-ветровые нагрузки вызывают не только обрывы проводов, но и разрушение несущих опор.

В летний период особую опасность представляют грозы и волны жары, так как при высоких температурах воздуха происходит растяжение проводов, при этом возможны их провисание и контакт с соседними проводами, вызывающий короткое замыкание. Удельный ущерб при различной длительности перерывов электроснабжения зависит от категории пользователей электроэнергии (Доклад..., 2017).

Гололедно-изморозевые отложения на проводах воздушных линий наблюдаются практически на всей территории России, но их вид и интенсивность неодинаковы в разных регионах. Для ЛЭП особенно опасны такие виды гололедно-изморозевых отложений как зернистая изморозь, гололед и отложения мокрого снега, так как именно они создают значительную дополнительную нагрузку за счет своей большой плотности. Эти отложения в основном образуются при температуре воздуха от 0 до -5°C с наветренной стороны провода. Ожидается, что к середине XXI в. число дней с переходом температуры воздуха через 0°C увеличится на всей территории РФ. Максимальные изменения прогнозируются на Европейской территории России, на юге Сибирского ФО и на восточном побережье Дальневосточного ФО (Катцов и др., 2020). Наблюдаемая тенденция к росту температуры воздуха, увеличению циклов перехода температуры через 0°C , учащение случаев ледяных дождей — это все способствует увеличению гололедных нагрузок на территории России.

Анализ изменения различных видов гололедно-изморозевых отложений за последние 30 лет показал, что с ноября по март наблюдается увеличение веса отложений мокрого снега на Европейской территории России и в Западной Сибири.

В Хабаровском крае вес отложений увеличился до 30 %. Вес отложения мокрого снега в среднем варьирует от 50 до 400 г/см, и его увеличение даже на 20 % может серьезно отразиться на электроэнергетике (Аржанова, Коршунова, 2019).

Воздушные линии электропередач значительно подвержены ветровому воздействию. Имеющиеся данные не дают основания говорить об увеличении ветровых нагрузок, поскольку анализ рядов наблюдений за скоростью ветра на метеорологических станциях показал слабо выраженную отрицательную тенденцию (ОД2, 2014). Однако следует принимать во внимание увеличение числа опасных явлений, связанных с ветровой нагрузкой (ураганы, штормы, смерчи и пр.), которое необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушных линий. Наибольшую опасность для возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера (в том числе нарушение электроснабжения) создают именно сильные ветры практически на всей территории РФ (Доклад..., 2020). Ветровая нагрузка, действуя на обледенелый провод, создает результирующую гололедно-ветровую нагрузку, которая зависит от скорости ветра при гололеде и размеров отложения (Методические рекомендации..., 2017). Под действием этой нагрузки провода скручиваются, вибрируют (начинается «пляска»), что уменьшает их прочность и может приводить к обрыву ВЛ.

Грозовая деятельность является основной причиной отключения линий электропередач. Грозовые перенапряжения на высоковольтных линиях возникают в результате прямого удара молнии в ВЛ, при этом линия временно обесточивается, а потребители недополучают электроэнергию. Полностью защитить ВЛ от воздействия гроз невозможно, поэтому при проектировании учитывается число возможных грозовых отключений. Интенсивность грозовой деятельности оценивается по числу дней с грозами и их продолжительности. В последние десятилетия положительного тренда грозовой активности не наблюдается, максимальные ее значения над северным полушарием отмечались в 1950–1960-е гг. (ОД2, 2014).

На работу воздушных линий влияет и температура воздуха, так как от нее зависит степень натяжения или провисания проводов.

Сочетание низких температур воздуха с большими скоростями ветра создают дополнительную нагрузку на линии, приводят к их преждевременному износу и ослаблению узлов соединения (Гашо и др., 2018а).

Тепловые расчеты линий электропередач важны при их проектировании и эксплуатации. Потери электрической энергии, пропускная способность электрических сетей зависят от температуры проводов, которая связана с температурой окружающей среды, скоростью ветра и солнечной радиацией. Климатические факторы и их изменения необходимо учитывать при прогнозировании возможной максимальной токовой нагрузки (Бигун и др., 2017).

Наблюдаемый рост температуры воздуха на территории России в целом негативно сказывается на функционировании линий электропередач. Увеличение числа суток с экстремально высокими значениями температуры воздуха в летний сезон (Катцов и др., 2020) отрицательно влияет на процесс передачи электроэнергии, приводит к уменьшению исходной передаваемой мощности. При повышении температуры воздуха до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ передаваемая мощность уменьшается на 2,25 % на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при повышении температуры до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ возникает опасность аварийных ситуаций при перегреве ЛЭП, что может вызвать прекращение передачи электроэнергии (Александров, 2006).

Повышения температуры воздуха в зимний период и увеличение случаев выпадения жидких осадков, в том числе переохлажденного дождя, приведут к росту рисков опасного гололедообразования и аварий на ЛЭП (Оценка..., 2011).

Рост числа опасных и неблагоприятных явлений, таких как волны жары и холода, сильные дожди, снегопады, гололедно-изморозевые отложения, сильные ветры, может привести к увеличению повторяемости аварий на ЛЭП (Доклад..., 2020). Ожидается, что эта тенденция сохранится и даже увеличится в XXI в. (IPCC 2012). В целом, на фоне возникающих экстремальных атмосферных нагрузок многие конструкции ЛЭП функционируют только благодаря запасу прочности, что влечет за собой высокую вероятность их разрушения (ОД2, 2014).

Воздушные линии электропередач являются важнейшей частью энергетической системы России, поэтому необходимо повысить их устойчивость к возможным воздействиям климата. Важным мероприятием, направленным на предотвращение ущерба от ветровых нагрузок, является вырубка деревьев вдоль ЛЭП. Расширение зоны вырубки деревьев позволит минимизировать ущерб, связанный с падением деревьев. Еще одной необходимой адаптационной мерой является выполнение регламентов по обслуживанию и эксплуатации элементов системы электроснабжения. Своевременная замена предаварийных опор и проводов не только повысит надежность ЛЭП, но и будет экономически выгодна, поскольку затраты на адаптацию не будут превышать прогнозируемые ущербы (Гаши и др., 2018б).

В условиях меняющегося климата важно своевременно уточнять и актуализировать карты климатического районирования, используемые при проектировании линий электропередач. Основным нормативным документом при проектировании и эксплуатации ЛЭП является ПУЭ-7, в котором в качестве нормативной величины принята повторяемость климатических нагрузок 1 раз в 25 лет.

Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE) и международная электротехническая комиссия (IEC) рекомендуют определять расчетные нагрузки на ВЛ, исходя из требуемого уровня надежности ВЛ (для ВЛ 220 кВ и ниже — 1 раз в 50 лет, для ВЛ 330 кВ и выше — 1 раз в 150 и 500 лет). С целью гармонизации российских и международных норм в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» разработаны методические указания по определению климатических нагрузок для задач проектирования ВЛ и региональные карты климатического районирования, позволяющие определять климатические нагрузки с любой вероятностью неперевышения (Луговой и др., 2014).

Работа выполнена при поддержке Росгидромета в рамках направления 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата,

климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агентьева Е. М., Тусов Г. А. (2015). Использование программного продукта ClimРАСТ для оценок воздействия климатических факторов на производство электроэнергии (на примере функционирования ТЭС и АЭС) // Труды ГГО. Вып. 578. С. 86–100.

Александров Г. Н. (2006). Режимы работы воздушных линий электропередач: учеб. пособие. — СПб: Издание центра подготовки кадров энергетики. 139 с.

Аржанова Н. М., Коришанова Н. Н. (2019). Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата // Труды ВНИИГМИ–МЦД. № 184. С. 33–44.

Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание (2015) / под ред. С. В. Киселевой, Г. В. Ермоленко и О. С. Попель. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 160 с.

Бигун А. Я., Сидоров О. А., Осипов Д. С. [и др.] (2017). Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи // Динамика систем, механизмов и машин. Т. 5, № 3. С. 8–17.

Гаши Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А. (2018а). Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы // Надежность и безопасность энергетики. Т.11, № 3. С. 208–216. URL: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-208-216>.

Гаши Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А., Началов А. В. (2018б). Расчет ущербов электротехнического комплекса московского мегаполиса от опасных климатических изменений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. № 4. С. 439–450.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017) / под ред. В. М. Катцова. — СПб: ООО «Амирит». 106 с.

Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) (2020). — СПб: ООО «Амирит». 120 с.

Доронина О. И., Шевченко Н. Ю., Бахтияров К. Н. (2015). Оценка надежности воздушных линий электропередачи с учетом климатических факторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 9 (часть 2). С. 226–230.

Ермоленко Б. В., Ермоленко Г. В., Проскуракова Л. Н. (2017). Насколько высок технически реализуемый потенциал ВИЭ в России? Наиболее перспективные регионы для развития ветровой, солнечной и малой гидрогенерации, биоэнергетики // ТЭК России. № 9. С. 22–27.

Калатузов В. А. (2014). Натурные исследования градиен и систем технического водоснабжения // *Промышленная энергетика*. № 10. С. 25–31.

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

Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М. (2022). Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6 // *Труды ГГО*. Вып. 604. С. 5–54.

Климатические факторы возобновляемых источников энергии (2010) / под ред. В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой, Г. И. Сидоренко. — СПб: Наука. 234 с.

Клименко В. В., Терешин А. Г., Федотова Е. В. (2019). Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. Т. 25. № 3. С. 6–27.

Луговой В. А., Тимашова Л. В., Черешнюк С. В. (2014). Учет климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи // *Энергия Единой Сети*. № 3 (14). С. 30–40.

Максимов В. (2019). Геотермальная энергетика: преимущества и перспективы / *repen.ru*. URL: <https://repen.ru/geothermal-energy-advantages-and-prospects>.

Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство. Транспорт (2017). — СПб: ГГО, Росгидромет. 160 с.

ОД2 (2014). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Основной том / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. — М.: Росгидромет. 1009 с.

Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (2011) / под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — М.: Д'АРТ. 252 с.

Тюсов Г. А., Акентьева Е. М., Павлова Т. В., Школьник И. М. (2017). Оценки возможного влияния будущих изменений климата России на функционирование объектов энергетики // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 47–57.

Школьник И. М., Мелешко В. П., Стадник В. В. [и др.] (2014). Влияние изменений климата на производство и потребление энергии в России // *Труды ГГО*. Вып. 573. С. 92–222.

Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. 79 с. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.

Aivalioti S. (2015). Electricity Sector adaptation to heat waves. Sabin Center for Climate Change Law // *Columbia Law School Research Paper*. № 14-439. 44 p.

Bloom A., Kotroni V., Lagouvardos K. (2008). Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. V. 8, Is. 6. P. 1249–1257.

Breslow P. B., Sailor D. J. (2002). Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States // *Renewable Energy*. V. 27, № 4. P. 585–598.

Carvalho D., Rocha A., Gómez-Gesteira M., Silva Santos C. (2017). Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections // *Renewable Energy*. V. 101. P. 29–40.

Ebinger J., Vergara W. (2011). *Climate Impacts on Energy Systems: Key Issues for Energy Sector Adaptation*. World Bank Study. — Washington: The World Bank. 178 p. URL: https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/E-Book_Climate%20Impacts%20on%20Energy%20Systems_BOOK_resized.pdf.

Feron S., Cordero R., Damiani A., Jackson R. (2021). Climate change extremes and photovoltaic power output // *Nature Sustainability*. V. 4 (3). P. 270–276.

IPCC 2011: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2012) / eds.: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona [et al.]. — New York: Cambridge University Press. 1088 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.

IPCC 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2012) / eds.: C. Field, V. Barros, T. Stocker [et al.]. — New York: Cambridge University Press. 594 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.

IRENA (2017). *REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Russian Federation* / Working paper, IRENA, Abu Dhabi. URL: www.irena.org/remap.

IRENA (2020). *Renewable Capacity Statistics 2020. Renewable capacity highlights*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.pdf.

Jerez S., Tobin I., Vautard R. [et al.] (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe // *Nature Communications*. V. 6. Article number 10014. DOI: 10.1038 / ncomms10014.

OSCE. *Protecting Electricity Networks from Natural Hazards*. Organization for Security and Cooperation in Europe (2016). 124 p. URL: <https://www.osce.org/files/f/documents/a/d/242651.pdf>.

Peters I. M., Buonassisi T. (2019). The impact of global warming on silicon PV energy yield in 2100. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.00622>.

Shepovalova O. V. (2015). Energy saving, implementation of solar energy and other renewable energy sources for energy supply in rural areas of Russia // *Energy Procedia*. V. 74. P. 1551–1560.

Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S. (2017). Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Climate Dynamics*. V. 50. P. 215–230.

Steininger K. W., König M., Bednar-Friedl B. [et al.] (2015). Economic evaluation of climate change impacts development of a cross-sectoral framework and results for Austria // Environment Development and Sustainability. V. 20. P. 1901–1903.

Totschnig G., Müller A., Hummel M. [et al.] (2017). Climate change impact and resilience in the electricity sector: The example of Austria and Germany // Energy policy. V. 103. P. 238–248.

Wild M., Folini D., Henschel F. [et al.] (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems // Solar Energy. V. 116. P. 12–24.

УДК 551.583

Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6. Катцов В.М., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Мелешко В.П., Спорышев П.В., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 5–54.

Рассматриваются результаты анализа сценарного прогнозирования климата на территории России в XXI в. с помощью ансамбля климатических моделей СМIP6. Приводятся оценки для новых сценариев радиационного воздействия на климатическую систему SSP. Эти результаты сопоставляются с результатами расчетов с моделями СМIP5 для сценариев RCP.

В целом, согласно расчетам с моделями СМIP6 для сценариев семейства SSP, оценки ожидаемых изменений климата на территории Российской Федерации в XXI веке качественно согласуются с оценками, полученными ранее для сценариев SRES и RCP.

Ключевые слова: ожидаемые изменения климата, сценарии радиационного воздействия, ансамбли климатических моделей СМIP6 и СМIP5.

Табл. 5. Ил. 24. Библ. 44.

УДК 551.582

Федеральные округа России: изменения климата и экономика. Школьник И.М., Акентьева Е.М., Клюева М.В., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Фасолько Д.В., Разова Е.Н., Рудакова Ю.Л., Павлова В.Н. Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 55–201.

Проводится анализ наблюдаемых и прогнозируемых воздействий на климатические ресурсы экономики в разрезе федеральных округов. Приводятся описание и обзор состояния дел в условиях изменяющегося климата в области добывающей промышленности и в основных приоритетных направлениях климатического обслуживания (в сфере сельского хозяйства, здравоохранения, водных ресурсов, энергетики, строительства, транспорта), а также особенностей развития регионального туризма.

Ключевые слова: изменение климата, федеральные округа, отрасли экономики, адаптация.

Ил. 45. Библ. 56.

Влияние изменения климата на основные отрасли добывающей промышленности России. Акентьева Е. М. Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 202–220.

Анализируются различные аспекты воздействия наблюдаемых и прогнозируемых изменений значений базовых и специализированных климатических характеристик на инфраструктуру добывающей промышленности. Отмечается, что особенности воздействия климатических изменений на объекты и процессы в добывающей промышленности зависят главным образом от способа добычи полезных ископаемых (закрытого, т. е. с использованием скважин и шахт или открытого, т. е. карьерного), физических и химических свойств добываемого сырья, а также последствий для окружающей среды. Сформулирован ряд предложений по адаптации добывающей промышленности к изменениям климата на территории России, уменьшающих как физические (инфраструктурные), так и репутационные и социальные риски.

Ключевые слова: изменение климата, добывающая промышленность, нефтегазовый сектор, опасные природные явления, медленные климатические изменения, адаптация.

Табл. 1. Ил. 10. Библ. 22.

О влиянии климата на производство энергии. Е.М. Акентьева, Стадник В.В., Фасолько Д.В., Задворных В.А. Труды ГГО. 2022. Вып. 604. С. 221–254.

В статье рассматривается влияние изменений климата на производство энергии, вырабатываемой на тепловых (ТЭС) и атомных станциях (АЭС), на природный потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ), на выработку электроэнергии на объектах возобновляемых источников энергии и передачу энергии по линиям электропередач (ЛЭП). Отмечается, что на всей территории страны к середине века ожидается увеличение частоты сухих периодов и периодов с аномально высокими температурами. В связи с этим для повышения надежности и эффективности работы АЭС и ТЭС необходимы комплексные меры адаптации.

Прогнозные оценки ресурсного потенциала солнечной и ветровой энергии показали, что их изменения будут носить преимущественно региональный характер.

Анализируются различные климатические факторы, от которых зависит бесперебойное функционирование воздушных линий электропередач. Приводится ряд мероприятий, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушных линий.

Ключевые слова: производство энергии, возобновляемые источники энергии, природный потенциал, воздушные линии электропередач.

Табл. 2. Ил. 7. Библ. 49.

Climate change projections over the territory of Russia through the XXI century based on ensembles of CMIP6 models. Kattsov V.M., Pavlova T.V., Govorkova V.A., Meleshko V.P., Sporyshev P.V., Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M. Proceedings of MGO. 2022. V. 604. P. 5–54.

Results are analyzed of climate projections over the territory of Russia through the XXI century using ensembles of CMIP6 models. The projections are shown for 3 new scenarios of radiative forcing of the climate system SSP. A comparison is undertaken with CMIP5 projections under RCP scenarios.

In general, the projected climate changes over the territory of Russia obtained from CMIP6 model generation under SSP scenarios are in qualitative agreement with those derived from previous model generations under RCP and SRES scenarios.

Keywords: projected climate change, scenarios of radiative forcing, CMIP6 and CMIP5 climate model ensembles.

Tab. 5. Fig. 24. Ref. 44.

Federal districts: climate change and economy. Shkolnik I.M., Akentyeva E.M., Klueva M.V., Stadnik V.V., Khlebnikova E.I., Faselko D.V., Razova E.N., Rudakova Yu. L., Pavlova V.N. Proceedings of MGO. 2022. V. 604. C.55–201.

An analysis of the observed and projected impacts on the climatic resources of the economy across federal districts is carried out. Description and an overview of the state of things in primary sector and other priority sectors for climate services (the agriculture, health service, water resources, energetics, construction, transport) as well as development challenges in the regional tourism.

Keywords: climate change, federal districts, economy sectors, adaptation.

Fig. 45. Ref. 56.

The impact of climate change on the main sectors of the extractive industry in Russia. Akentyeva E. M. Proceedings of MGO. 2022. V. 604. C. 202–220.

The article analyzes various aspects of the impact of observed and projected changes in the values of basic and tailored climatic characteristics on the infrastructure of the extractive industry. It is noted that the features of the impact of climate change on objects and processes in the mining industry depend mainly on the method of mining (closed, i.e. using wells and mines or open, i.e. quarry), physical and chemical properties of the extracted raw materials and the consequences for the environment. A number of proposals have been formulated to adapt the mining industry to climate change in Russia, reducing both physical (infrastructural) and reputational and social risks.

Keywords: climate change, extractive industry, oil and gas sector, natural hazards, slow onset events related to climate change, adaptation.

Tab. 1. Fig. 10. Ref. 22.

On the impact climate on energy production. Akentyeva E.M., Stadnik V.V., Fasolko D.V., Zadvornykh V.A. Proceedings of MGO. 2022. V. 604. C. 221–254.

The article discusses the impact of climate change on the production of energy generated at thermal power plants (TPPs) and nuclear power plants (NPPs), on the natural potential of renewable energy sources (RES), on the generation of electricity at renewable energy sources and on the energy transfer through power lines (TL). It is noted that throughout the country by the middle of the century, an increase in the frequency of dry periods and periods with abnormally high temperatures is expected. In this regard, comprehensive adaptation measures are needed to improve the reliability and efficiency of NPPs and TPPs.

Predictive assessments of the resource potential of solar and wind energy have shown that their changes will be mainly regional in nature.

Various climatic factors are analyzed, on which the uninterrupted operation of overhead power lines depends. A number of measures are given that must be taken into account in the design and operation of overhead lines.

Keywords: energy production, renewable energy sources, natural potential, overhead power lines.

Tab. 2. Fig. 7. Ref. 49.

Информация для авторов, представляющих рукописи в журнал «Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова»

К публикации в журнале «Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова» (далее – Труды ГГО) принимаются статьи с результатами оригинальных исследований, сообщения и обзоры по разделам: физика атмосферы, прикладная метеорология, загрязнение атмосферы, климатология. дистанционное зондирование и активные воздействия.

Все представленные для публикации статьи рецензируются анонимно.

Библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научно-электронной библиотеке elibrary.ru.

Публикация в журнале бесплатная.

Представляемые в журнал статьи должны быть оригинальными, не допускается дублирование ранее опубликованных рукописей или рукописей, представленных для публикации в другие издания.

Рекомендуемая структура статьи: введение, материалы и методы исследования, результаты, обсуждение, выводы (или заключение), благодарности или ссылки на гранты, при поддержке которых выполнена работа, список литературы.

В рукописи статьи должны быть приведены: индекс по универсальной десятичной классификации (УДК), название статьи, инициалы и фамилии авторов, название и адрес организации (все на русском и английском языке), электронный адрес ведущего автора. Аннотация объемом не более 12 строк, ключевые слова – не более 10 на русском и английском языках.

В разделе Выводы (или Заключение) нежелательно дословное тезисное повторение текста из предыдущих разделов статьи.

Список литературы не нумеруется. Фамилия и инициалы автора (авторов) выделяются курсивом. В тексте ссылки приводятся в круглых скобках, например: (Иванов и др., 2020). При наличии ссылок на несколько работ одного автора, опубликованных в одном году, рядом с годом издания указывается буква русского алфавита,

показывающая порядок данного издания в списке литературы, например, (Иванов, 2020а).

Рисунки и таблицы помещаются в тексте. Номер и название таблицы указываются над ней, номер название рисунка – под ним.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman размером – 12 и напечатана через двойной интервал на одной стороне листа А4; с полями: нижнее и верхнее 20 мм, левое и правое – 15 мм.

Объем статьи не должен превышать 25 страниц формата А4, включая список литературы, таблицы и рисунки.

Рукопись должна быть подписана авторами с указанием фамилии, имени и отчества (полностью), ученой степени, звания, телефонов, адреса электронной почты.

В комплект статьи также входят экспертное заключение о возможности публикации рукописи в открытой печати (с подписью руководителя и печатью организации) и сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работают авторы.

Комплект документов для публикации (текст статьи, экспертное заключение о возможности публикации рукописи в открытой печати, сопроводительное письмо) следует присылать в ФГБУ «ГГО»:

194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

Электронная версия всех документов **в обязательном порядке** представляется по адресам: director@main.mgo.rssi.ru и makhotk@main.mgo.rssi.ru

Редакция сохраняет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 604

Подписано в печать 17.06.22. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 16,375. Тираж 300 экз. Заказ №0490.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ».

194044, Санкт-Петербург, Пироговская наб., д. 17 к. 6, литера А, помещ. 8.