



Научный совет РАН по проблемам климата Земли
Отделение наук о Земле РАН
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Под редакцией
академика РАН И.И. Мохова,
члена-корреспондента РАН А.А. Макоско,
к.ф.-м.н. А.В. Чернокульского

МОСКВА
2024



Scientific Council of the RAS on Earth's climate problems
Russian Academy of Sciences Earth Sciences Division
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

**CLIMATE CHANGE:
causes, risks, consequences,
adaptation and
regulation problems**

Edited by
Academician of the RAS I.I. Mokhov,
Correspondent member of the RAS A.A. Makosko
Doctor of Philosophy A.V. Chernokulsky

MOSCOW
2024

УДК 551.58
ББК 26.237
И 37

Рецензенты:
академик РАН Н.С. Касимов
член-корреспондент РАН В.И. Данилов-Данильян

Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования / Под ред. академика РАН И.И. Мохова, члена-корреспондента РАН А.А. Макоско, к.ф.-м.н. А.В. Чернокульского – М.: РАН, 2024. 360 с.

Коллективная монография содержит материалы ведущих ученых страны по актуальным вопросам проблематики изменения климата, основанные на обширном перечне научных публикаций и исследованиях авторов. Рассмотрены: климатические процессы и изменения, экстремальные режимы, предсказуемость; моделирование изменений земной климатической системы; экологические и социально-экономические последствия климатических изменений, риски и возможности; проблемы адаптации к изменениям климата; проблемы регулирования антропогенных воздействий на климат; углеродная нейтральность.

Книга предназначена как для специалистов – представителей профильных ведомств и организаций реального сектора экономики, так и для широкого круга специалистов, научных работников, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов образовательных учреждений, специализирующихся в данных областях.

Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and regulation. – М.: Russian Academy of Sciences, 2024 / Ed. academician of the RAS I.I. Mokhov, corresponding member of the RAS A.A. Makosko, Ph.D. A.V. Chernokulsky.

The collective monograph contains materials from the country's leading scientists on topical issues of climate change, based on an extensive list of scientific publications and research by the authors. Considered: climate processes and changes, extreme regimes, predictability; modeling changes in the earth's climate system; environmental and socio-economic consequences of climate change, risks and opportunities; problems of adaptation to climate change; problems of regulating anthropogenic impacts on climate; carbon neutrality.

The book is intended both for specialists - representatives of relevant departments and organizations of the real sector of the economy, and for a wide range of specialists, researchers, teaching staff, graduate students and students of educational institutions specializing in these areas.

Книга опубликована при содействии Вольного экономического общества России.

СОДЕРЖАНИЕ

К ЧИТАТЕЛЮ	8
ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ЧАСТЬ 1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ, ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ, ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ	13
<i>И.И. Мохов</i> РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ И ТРЕНДЫ НА ФОНЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ЕСТЕСТВЕННЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ПРИЧИНЫ, ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ, ПОСЛЕДСТВИЯ	14
<i>С.М. Семенов</i> МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ГРУППА ЭКСПЕРТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА (МГЭИК): ИТОГИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ	30
<i>В.М. Катцов</i> НОВЫЕ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА В КОНТЕКСТЕ РЕАГИРОВАНИЯ РОССИИ НА ГЛОБАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА	42
<i>Н.Н. Коришунова, Н.В. Швець, С.Г. Давлетишин</i> ИЗМЕНЕНИЯ НОРМ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА	58
<i>А.В. Чернокульский, А.В. Елисеев, Ф.А. Козлов, М.В. Курганский, И.И. Мохов, В.А. Семенов, А.А. Спрыгин, А.Н. Шихов, Ю.И. Ярынич</i> ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ В РОССИЙСКИХ РЕГИОНАХ	73
ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	83
<i>Р.М. Вильфанд, В.М. Хан, И.А. Куликова</i> ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ/СЕАКЦ	84
<i>Е.М. Володин, А.С. Гришун, В.В. Воробьева, М.А. Тарасевич, А.Ю. Черненко</i> ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН	100
<i>П.Н. Варгин, С.В. Кострыкин, А.В. Коваль, Е.В. Розанов, Т.Е. Егорова, С.П. Смышляев</i> ИЗМЕНЕНИЯ СТРАТОСФЕРЫ АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ В РАСЧЕТАХ МОДЕЛИ SOCOL4	110
<i>С.Н. Денисов, А.В. Елисеев, И.И. Мохов</i> ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОТОКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ CMIP6 И ИХ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В 21 ВЕКЕ	125

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ЧАСТЬ 3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ, РИСКИ И ВОЗМОЖНОСТИ	137
<i>А.Н. Гельфан, Н.Л. Фролова, В.Ю. Григорьев, А.С. Калугин, М.Б. Киреева, И.Н. Крыленко, Д.В. Магрицкий, Ю.Г. Мотовилов, А.А. Сазонов</i> ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И УГРОЗЫ ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ	138
<i>А.В. Матешева, А.А. Макоско, С.В. Емелина</i> О РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЯХ ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА	155
<i>А.В. Кислов, С.А. Огородов, Н.Н. Шабанова, С.А. Мысленков</i> НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КРИОЛИТОЗОНУ ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	171
<i>В.Г. Петросян, Ф.А. Осипов, И.Ю. Фенёва, А.А. Варшавский, Н.Н. Дергунова, Л.А. Хляп</i> ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ НА ДИНАМИКУ АРЕАЛОВ ОПАСНЫХ ИНВАЗИОННЫХ ВИДОВ В РОССИИ	192
<i>И.А. Макаров, А.В. Чернокульский</i> КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ В РОССИИ: РЕЙТИНГ РЕГИОНОВ ПО НЕОБХОДИМОСТИ АДАПТАЦИИ	208
ЧАСТЬ 4. ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА	223
<i>Б.Н. Порфирьев</i> АДАПТАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ И ЭКОНОМИКИ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ В СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ	224
<i>Б.А. Ревич</i> КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ	240
<i>О.Н. Липка, А.П. Андреева</i> ПОТЕНЦИАЛ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ В АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В РОССИИ	256
<i>Е.И. Белов</i> ОБ ОСНОВНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА	273
ЧАСТЬ 5. ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КЛИМАТ. УГЛЕРОДНАЯ НЕЙТРАЛЬНОСТЬ	281
<i>С.В. Алексеенко</i> РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И РАЗРУШЕНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ	282
<i>В.В. Клименко, А.В. Клименко, А.Г.Терешин</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИИ ПО ДОСТИЖЕНИЮ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ	298

<i>И.А. Башмаков, А.А. Лунин</i> РОССИЯ: УТРОЕНИЕ МОЩНОСТИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И УДВОЕНИЕ ТЕМПОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ К 2030 г.	316
<i>А.А. Онучин, И.М. Данилин, В.Е. Арясов</i> СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ КАРБОНОВЫХ ФЕРМ В ЦЕЛЯХ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА	334
<i>А.В. Ольчев, С.К. Гулев</i> КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ	343
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	356

К ЧИТАТЕЛЮ

Уважаемые читатели!

Изучение причин и прогнозирование последствий изменения климата, оценка эффективности планов по адаптации отраслей народного хозяйства к новой климатической реальности требуют пристального внимания со стороны научно-экспертного сообщества страны, активную поддержку которому Вольное экономическое общество России (ВЭО России) оказывает с момента своего основания в 1765 г. С тех же пор им уделяется особое внимание вопросам, связанным с исследованием природно-климатических зон страны, влиянием климата на отечественное сельское хозяйство и состояние почв. С конца XIX века Императорское Вольное экономическое общество России собирало сельскохозяйственную статистику, данные о лесах, снаряжало экспедиции для сбора сведений о черноземной полосе, занималось проблемами почв.

В настоящее время проблемы, связанные с климатическими изменениями и эффективной адаптацией экономики к ним, неизменно присутствуют в повестке масштабных проектов ВЭО России. В частности, им отведено важное место в программах Московского академического экономического форума (МАЭФ), организованного ВЭО России совместно с РАН и Международным Союзом экономистов, а также Энергетического форума, который входит в архитектуру МАЭФ, тематических конференций и семинаров. Тем самым ВЭО России не только продолжает исторические традиции, но и усиливает поддержку экспертно-аналитической деятельности, в первую очередь ведущих ученых РАН, включая авторов данной коллективной монографии.

Издаваемая в год 300-летия РАН при поддержке Вольного экономического общества России коллективная монография «Изменения климата: причины, риски, последствия», подготовлена по результатам Всероссийской конференции с международным участием, организованной Научным советом РАН по проблемам климата Земли, Отделением наук о Земле РАН, Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Она содержит новейшие, в том числе уникальные, результаты фундаментальных и прикладных исследований в области изменений климата, включая анализ и оценку социально-экономических последствий изменения климата, проблемы достижения углеродной нейтральности, адаптации к изменениям климата и регулирования антропогенных воздействий на климат, то есть затрагивает все наиболее актуальные вопросы мировой климатической повестки. Поэтому убежден, что книга вызовет живой интерес не только у специалистов-климатологов, но и у широкого круга читателей, включая представителей реального сектора экономики и профильных ведомств, ответственных за принятие решений в области климатической политики России.

Президент ВЭО России
член-корреспондент РАН
С.Д. Бодронов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данной коллективной монографии, издание которой приурочено к 300-летию Российской академии наук, представлены статьи, подготовленные на основе докладов, представленных на **Всероссийской конференции с международным участием «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (КЛИМАТ-2023)**. Это уже третья конференция с подобным названием. Она проходила 9-13 октября 2023 г. в г. Москве в здании Президиума РАН, как и предыдущая конференция (26-28 ноября 2019 г.).



Рис. 1. Тезисы докладов конференции «КЛИМАТ-2023»

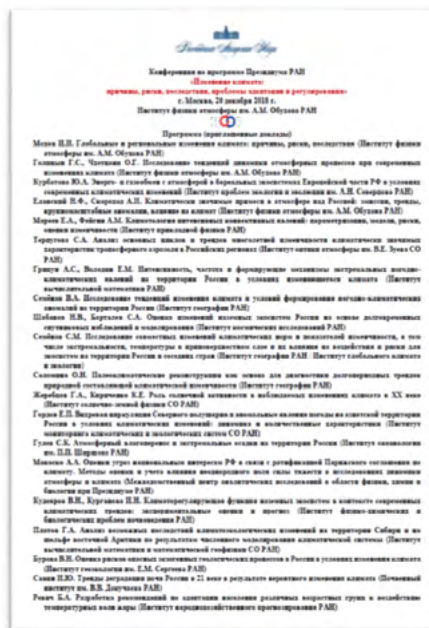


Рис. 2. Программа конференции «КЛИМАТ-2018»

Первая конференция, состоявшаяся 20 декабря 2018 г. в г. Москве в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН), была посвящена обсуждению результатов, полученных в рамках Программы Президиума РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Эта программа состояла из проектов институтов разных отделений РАН, на конференции были представлены 20 устных докладов.

Организатором первой конференции был ИФА РАН.

На второй конференции (КЛИМАТ-2019), в организации которой участвовали Отделение наук о Земле (ОНЗ) РАН и ИФА РАН, были представлены 73 устных доклада и 89 стендовых.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования



Рис. 3. Участники конференции «КЛИМАТ-2019»

В рамках пленарных, секционных и стендовых сессий выделялись следующие направления исследований: риск экстремальных климатических явлений; роль антропогенных эмиссий и природных потоков углерода в изменениях климата; уровень изменений климата, который следует считать опасным; оценка социально-экономических и политических последствий климатических изменений и адаптация к ним; проблемы регулирования воздействий на климатическую систему. По результатам этой конференции И.И. Моховым был сделан доклад на заседании бюро ОНЗ РАН.

Третья конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» в рамках мероприятий в связи 300-летием РАН была организована Научным советом РАН по проблемам климата Земли, ОНЗ РАН и ИФА РАН. На ней были представлены 145 устных докладов и 75 стендовых. В числе приветствовавших открытие конференции были вице-президенты РАН С.М. Алдошин и С.Н. Калмыков, председатель комитета Госдумы по природным ресурсам, собственности и земельным отношениям Госдумы Н.П. Николаев. Прислали приветствия Советник президента Российской Федерации по вопросам изменения климата Р.С.-Х. Эдельгериев и Президент Российского гидрометеорологического общества А.И. Бедрицкий.

В общей сложности в Конференции приняли участие более 400 ученых и специалистов из более 100 научных организаций. В конференции участвовали представители институтов РАН, ВУЗов, институтов Росгидромета, федеральных и региональных органов власти, институтов развития, коммерческих компаний и средств массовой информации.



Рис. 4. Plenарное заседание конференции «КЛИМАТ-2023»

Цель проведения третьей конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» – представить и обсудить новые актуальные результаты и проблемы в области изменений климата, способствовать интеграции, в том числе междисциплинарной, ведущих научных коллективов, проводящих фундаментальные и прикладные исследования в области изменений климата, способствовать взаимодействию различных научных коллективов, с представителями государственного и коммерческого сектора.

В Климатической доктрине Российской Федерации отмечено:

«Изменение климата является одним из наиболее серьезных вызовов XXI века, который выходит за рамки научных дискуссий и представляет собой комплексную междисциплинарную проблему, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации.

Особую обеспокоенность вызывает беспрецедентно высокая скорость глобального потепления, происходящего в течение последних десятилетий. Современ-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

менная наука находит все больше подтверждений тому, что хозяйственная деятельность человека, связанная, прежде всего, с выбросами парниковых газов, все сильнее влияет на климат на фоне его естественной изменчивости».

В рамках конференции наряду пленарным заседанием работа были секции по следующим направлениям:

1. Риск экстремальных климатических явлений.
2. Роль антропогенных эмиссий и природных потоков углерода в изменениях климата.
3. Уровень изменений климата, который следует считать опасным.
4. Оценка социально-экономических и политических последствий климатических изменений и адаптация к ним.
5. Проблемы регулирования воздействий на климатическую систему.

Проведение конференции должно способствовать развитию новых направлений фундаментальных и прикладных исследований в области климата, научного и информационного обеспечения адаптации к изменениям климата в отраслях и регионах в рамках Национального плана мероприятий по адаптации к изменениям климата, учета фактора изменения климата при разработке планов устойчивого развития РФ, в том числе, при реализации Климатической доктрины РФ, в рамках принятия и обеспечения решений в рамках международных климатических соглашений, в частности Парижского соглашения по изменениям климата, Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов, реализации Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений, реализации важнейших инновационных проектов государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

В данной коллективной монографии представлены результаты по актуальным направлениям исследований глобальных и региональных климатических проблем с особым вниманием к российским регионам.

Председатель Программного и Организационного комитетов Конференции,
Сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли
академик РАН
И.И. Мохов



1

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ,
ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ,
ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ**

РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ И ТРЕНДЫ НА ФОНЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ЕСТЕСТВЕННЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ПРИЧИНЫ, ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ, ПОСЛЕДСТВИЯ

И.И. Мохов

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
tokhov@ifaran.ru*

Аннотация. Анализируются региональные климатические аномалии и тренды, в частности в российских регионах, на фоне глобальных изменений с оценкой причин, предсказуемости, последствий. Особенности современных глобальных и региональных климатических аномалий и трендов по данным наблюдений (включая спутниковые данные) и реанализа сопоставляются с палеоклиматическими реконструкциями. Характеризуется роль естественных и антропогенных факторов в разных регионах. Оцениваются тенденции возможных в будущем глобальных и региональных климатических изменений и их последствий с использованием модельных расчетов.

Ключевые слова: климатические изменения, причины, предсказуемость, последствия

Проблема климатических изменений – одна из ключевых глобальных проблем современности. Последние десятилетия характеризуются значительными глобальными и региональными климатическими изменениями, особенно в высоких широтах (Climate Change, 2021; Третий оценочный доклад, 2022) (см. также (Мохов, 2022a)). На рис. 1 приведены изменения (тренды) среднегодовой температуры у поверхности для разных широт Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий для 50-летнего периода 1974-2023 гг. с максимальным потеплением до 4°C и более в арктических широтах по данным GISS (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Наибольшая скорость температурных изменений в арктических широтах (так называемое Арктическое усиление) формируется под влиянием ряда климатических обратных связей, в том числе из-за зависимости альбедо поверхности от температуры. В последние десятилетия быстро уменьшается протяженность морских льдов в Арктике (Climate Change, 2021; Мохов, Парфенова, 2021).

В (Мохов, 2022б) приведены аналитические условия для оценки вклада разных внутренних и внешних факторов в формирование Арктического (полярного) усиления при потеплении для Земной климатической системы – с более сильными изменениями приповерхностной температуры в высоких широтах по сравнению с более низкими.

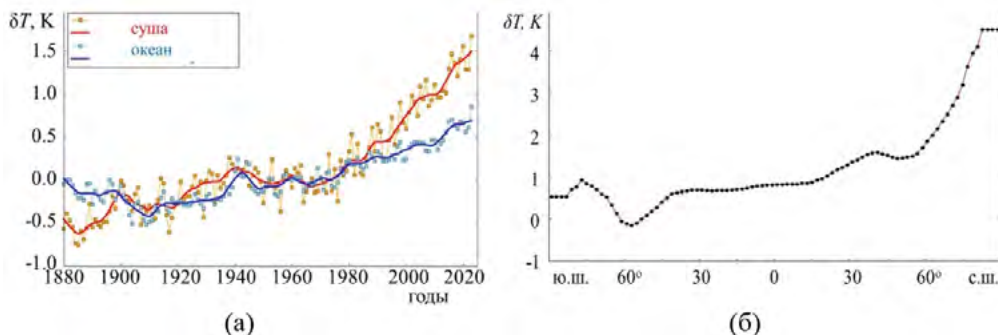


Рис. 1. Изменения среднегодовой температуры у поверхности над сушей и океаном Северного и Южного полушарий (а) и на разных широтах (б) по данным GISS для 50-летнего периода 1974-2023 гг.

При вариациях только альбедо с зависимостью альбедо от температуры $\alpha(T)$ с проявлением соответствующей (альбедо-температура) положительной обратной связи при неизменных других параметрах условие Арктического усиления принимает вид

$$dT_{ep}/dT_H = Q[S(1)d\alpha_p/dT_H - S(0)d\alpha_c/dT_H]/(B + \beta) < 0. \quad (1)$$

Здесь Q – солнечная постоянная; $S(x)$ – функция распределения потока солнечной радиации в зависимости от $x = \sin\varphi$, φ – широта; α – альбедо, зависящее от приповерхностной температуры T и широты φ ; T_H – полушарная приповерхностная температура; A , B и β – параметры, характеризующие поток уходящей тепловой радиации и меридиональный приток тепла. Изменения альбедо могут быть связаны с разными причинами, в том числе со снежно-ледовым покровом в высоких широтах и с эффектами опустынивания в более низких широтах, с изменением в атмосфере содержания аэрозоля, с облачностью (Мохов, 2022). В рассматриваемом случае с учетом $B + \beta > 0$ условие (1) для проявления Арктического усиления при потеплении сводится к условию

$$S(1)/S(0) > (-d\alpha_c/dT_H)/(-d\alpha_p/dT_H). \quad (2)$$

Это выполняется, в частности, если $\alpha_c = \text{const}$, или при $d\alpha_p/dT_H < 0$, если $d\alpha_c/dT_H > 0$.

На фоне глобального потепления с Арктическим усилением и быстрого уменьшения протяженности морских льдов в Арктике по спутниковым данным, до-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ступным с конца 1970-х годов, вплоть до последних лет отмечалось статистически незначимое увеличение протяженности антарктических морских льдов. Это было связано с общим понижением температуры у поверхности в приантарктических широтах в результате региональных проявлений естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне глобального векового потепления с относительно слабым температурным трендом над океаном в ЮП. С 2016 г. отмечено резкое уменьшение площади морских льдов в Южном океане. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности морских льдов в последние десятилетия не только в Арктике, но и в Антарктике в соответствии с модельными прогностическими расчетами с учетом антропогенных воздействий (Мохов, Парфенова, 2021).

Количественные эмпирические оценки вклада антропогенных воздействий, характеризующихся изменениями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и ключевых мод естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон СП и ЮП на различных временных горизонтах получены в (Мохов, Смирнов, 2022; Mokhov, Smirnov, 2022) с использованием данных наблюдений (Табл. 1). С использованием авторегрессионных моделей и данных с XIX века оценена роль в формировании температурных трендов Атлантической мультideсятилетней осцилляции (АМО), Эль-Ниньо/Южного колебания, Тихоокеанской десятилетней осцилляции (PDO), Тихоокеанской междесятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции. Результаты анализа свидетельствуют о существенной роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании тренда глобальной приповерхностной температуры, усиливающейся с увеличением временного горизонта. При этом отмечены значительные различия для широтных зон ЮП и СП, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости. При более слабых температурных трендах в широтных зонах ЮП с большим покрытием океанами, чем в СП, вследствие естественных колебаний климата могут проявляться и проявляются отрицательные тренды приповерхностной температуры на интервалах в несколько десятилетий на общем фоне долгопериодного глобального потепления. С отмеченными глобальными и региональными особенностями температурных вариаций связана одна из ключевых климатических проблем до последних лет – разнонаправленные тренды протяженности антарктических и арктических морских льдов.

Следует отметить, что модельные и эмпирические оценки современных изменений климата с ключевой ролью антропогенных воздействий на фоне естественной изменчивости не противоречат результатам анализа данных, в частности данных палеорекоkonструкций по содержанию антарктических ледовых кернов, с общим запаздыванием содержания парниковых газов относительно температурного режима (Мурышев и др., 2015; Muryshev et al., 2017).

В связи с возможными в XXI веке сценариями антропогенных воздействий ожидаются значительные климатические изменения, в частности в арктических

Табл. 1. Оценки относительного вклада парниковых газов в тренды приповерхностной температуры для периодов разной продолжительности относительно современного режима (2012 г.)

период (годы)	глобальное осреднение	тропики СП (ЮП)	средние широты СП (ЮП)	высокие широты СП (ЮП)
20	0.58	0.61 (1.00)	0.41 (1.38)	0.33 (-0.52)
30	0.62	0.71 (1.22)	0.44 (1.86)	0.41 (-0.68)
50	0.82	0.86 (0.95)	0.68 (1.15)	0.64 (1.87)

широтах (Climate Change, 2021). В (Парфенова и др., 2022) проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в 21 веке на основе моделей ансамбля CMIP5 при сценарии антропогенных воздействий RCP 8.5 с использованием методов байесовского осреднения с выделением различных участков СМП (рис. 2). Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Средние ансамблевые оценки изменения ПНП в целом устойчивы к выбору предположений, связанных с вычислением байесовских весов. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза – для восточной.

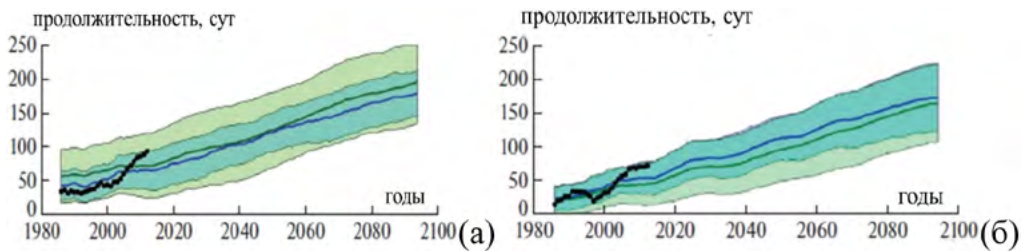


Рис. 2. Оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути для Баренцева и Карского морей (а) и моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (б) с использованием байесовского подхода по расчетам с ансамблем климатических моделей с учетом антропогенных воздействий

В (Акперов и др., 2022) получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели при сценариях умеренных (RCP4.5) и более сильных (RCP8.5) антропогенных воздействий в XXI веке (рис. 3). При анализе оценивалась мощ-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. При этом изменения более значимо проявляются при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для XXI века.

Современное повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в значительной мере вследствие гидрологических и метеорологических аномалий (<https://www.munichre.com/>). Наиболее заметно новые тенденции проявляются в повторяемости и интенсивности экстремальных региональных явлений и процессов (Climate Change, 2021).

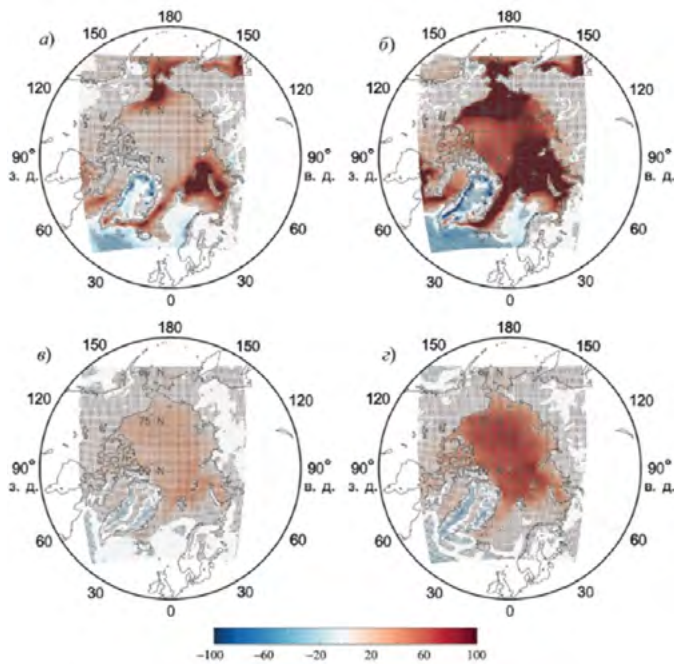


Рис. 3. Изменения среднесезонных значений мощности ветрового потока ($Вт/м^2$ за 10 лет) в 2006–2100 гг. зимой (а, б) и летом (в, г) по расчетам с использованием региональной климатической модели при сценариях умеренных (а, в) и более сильных (б, г) антропогенных воздействий

По данным Росгидромета (<http://www.meteorf.ru>), число опасных метеорологических явлений за последние два десятилетия увеличилось примерно втрое на фоне быстрого потепления в России – со скоростью примерно 0.5 К за десятилетие (в два с половиной раза быстрее глобального), а в ряде регионов – около 1 К за десятилетие. При этом наибольшее количество гидрометеорологических аномалий отмечается в тёплые месяцы – чаще летом (рис. 4). Число опасных метеорологических явлений в России с 1998 по 2019 г. увеличивалось в среднем на 21 событие в год, а летом (40% общего количества за год) – в среднем на 10 событий в год. В частности, для летних сезонов последних лет отмечена статистически значимая связь (на уровне 90%) количества опасных метеорологических

явлений с температурными аномалиями – с его ростом на 45% при увеличении приповерхностной температуры на 1 К для России в целом (Мохов, 2022а).

На основе данных наземных и спутниковых наблюдений в последние десятилетия получены количественные оценки изменений в российских регионах повторяемости и интенсивности различных опасных погодно-климатических явлений, включая сильные ливни, грозы, град, шквалы, смерчи (Чернокульский и др., 2022). Результаты свидетельствуют об общей интенсификации опасных конвективных погодно-климатических процессов и явлений с ростом повторяемости наиболее сильных явлений в большинстве регионов России.

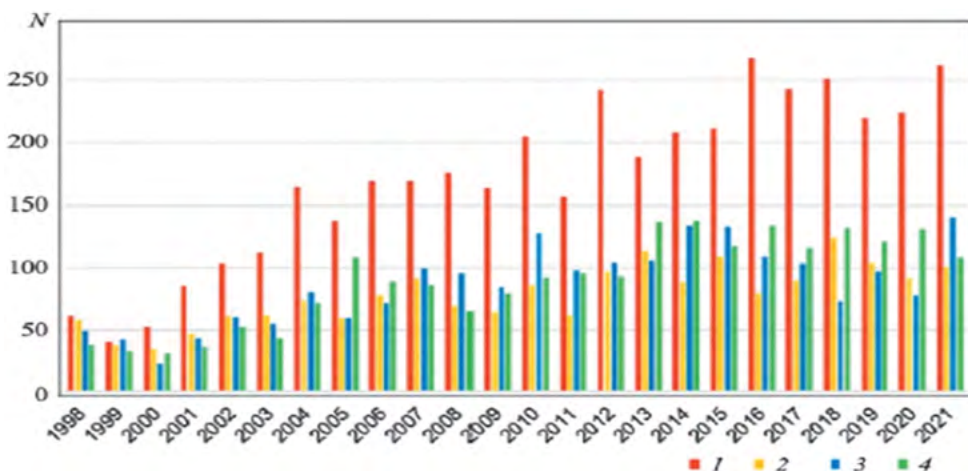


Рис. 4. Межгодовые изменения количества опасных метеорологических явлений в России в разные сезоны (1- лето, 2 – осень, 3 – зима, 4 - весна) по данным Росгидромета

Отмечены значимые тенденции увеличения повторяемости трансформации тропических циклонов во внетропические для Земли в целом в последние десятилетия (Мохов и др., 2020). Проявляются особенности разных океанических бассейнов СП и ЮП. В том числе отмечен значимый тренд роста повторяемости событий трансформации тропических циклонов во внетропические для северо-западной акватории Тихого океана с выходом циклонов в прибрежные внетропические регионы Евразии, включая Дальний Восток. На фоне этого общего тренда проявляются существенные вариации для разных фаз явлений Эль-Ниньо.

В (Мохов, 2023) представлены оценки изменений количества опасных метеорологических явлений N в российских регионах (dN/dt , dN/dT_{NH}) на фоне их средних значений ($\langle N \rangle$) при изменениях приповерхностной температуры СП (dT_{NH}/dt) по данным для периода 1998-2021 гг. (рис. 5, табл. 2).

Более 2/5 опасных метеорологических явлений отмечается в летние сезоны, для которых характерно и наиболее сильное увеличение повторяемости в последние десятилетия – почти в полтора раза при увеличении приповерхностной температуры СП на 1 К. Сильно возрастает повторяемость экстремальных явле-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ний также весной, минимальный относительный рост отмечен для зимних сезонов. Выявлены знаковые изменения – в последние годы в среднем отмечается не менее одного опасного метеорологического явления в сутки для России в целом, а для летних сезонов – от двух до трех экстремальных явлений в сутки. Отмечена связь выявленных тенденций (с более значимым ростом повторяемости опасных метеорологических в летние месяцы) с изменением температурной стратификации атмосферы и ее влагоемкости и усилением конвективных процессов в атмосфере при потеплении. На фоне общей тенденции увеличения повторяемости экстремальных метеорологических событий в последние десятилетия отмечают особенности, связанные с ключевыми модами климатической изменчивости, проявляющиеся, в частности, в режимах атмосферных блокирований (Мохов, 2022а; Мохов, 2023).

Табл. 2. Оценки средних значений $\langle N \rangle$, dN/dt , dT_{NH}/dt , dN/dT_{NH} и соответствующих коэффициентов корреляции r для разных сезонов и для года в целом (индекс Σ) по данным для российских регионов для периода 1998-2021 гг. В скобках отмечены СКО. В квадратных скобках приведены параметры, характеризующие относительные (в %) изменения

1999-2021 гг.	$\langle N \rangle$ (\pm СКО) $[\langle N \rangle / \langle N_{\Sigma} \rangle]$	$dN/dt, (10 \text{ лет})^{-1}$ $[N^{-1}dN/dt, \% / 10 \text{ лет}]$ (\pm СКО) r	$dT_{NH}/dt, \text{ K} / 10 \text{ лет}$ (\pm СКО) r	$dN/dT_{NH}, \text{ K}^{-1}$ $[N^{-1}dN/dT_{NH}, \% / \text{K}]$ (\pm СКО) r
год	422 (± 144) [1] 86	189 (± 18) [45 (± 4)] 0.91 34 (± 6)	0.27 (± 0.04) 0.86	516 (± 85) [122 (± 20)] 0.79 47 (± 23)
зима	(± 31) [0.20] 89	[39 (± 7)] 0.74 45 (± 5)	0.26 (± 0.06) 0.68	[55 (± 27)] 0.40 108 (± 20)
весна	(± 35) [0.21] 175	[51 (± 6)] 0.88 82 (± 9)	0.29 (± 0.05) 0.81	[121 (± 22)] 0.76 249 (± 41)
лето	(± 64) [0.41] 78	[47 (± 5)] 0.88 28 (± 4)	0.25 (± 0.03) 0.86	[142 (± 24)] 0.79 74 (± 13)
осень	(± 23) [0.18]	[35 (± 5)] 0.82	0.30 (± 0.04) 0.88	[95 (± 17)] 0.77

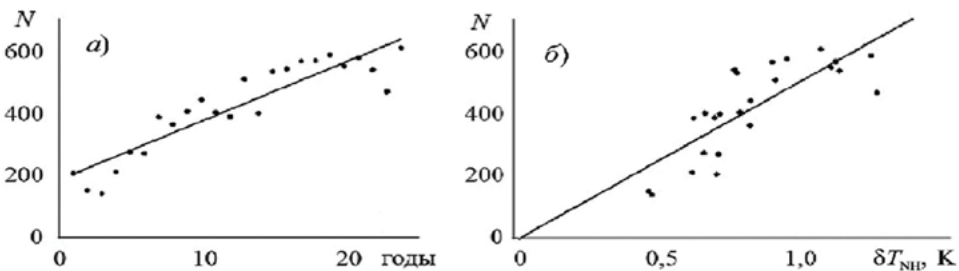


Рис. 5. Количество опасных метеорологических явлений в России N в зависимости от времени (годы относительно 1997 г.) (а) и в зависимости от среднегодовых аномалий (относительно периода 1961-1990 гг.) приповерхностной температуры СП δT_{NH} [K] по данным для периода 1998-2021 гг. Прямые соответствуют линейным регрессиям

Результаты анализа данных для последних десятилетий свидетельствуют о значимом увеличении общей продолжительности (τ) атмосферных блокирований, в частности зимних, в СП (Мохов, 2023). Отмеченная тенденция выявлена на фоне быстрого увеличения приповерхностной температуры СП T в зимние сезоны (см., напр., рис. 6).

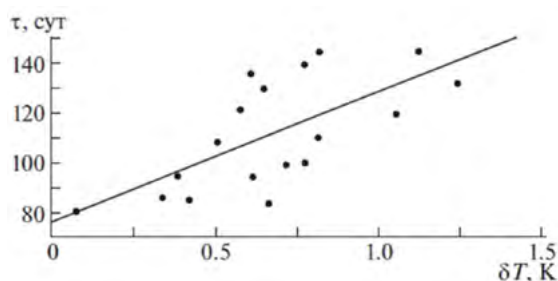


Рис. 6. Общая продолжительность атмосферных блокирований τ [сут] в СП более 80 сут/сезон в зависимости от аномалий (относительно базового периода 1961–1990 гг.) приповерхностной температуры СП δT [K] для зимних сезонов в 1980–2018 гг. Прямая линия соответствует линейной регрессии

Полученная статистически значимая оценка соответствует увеличению τ более чем в полтора раза при увеличении среднезимней приповерхностной температуры СП на 1К. Более значимые оценки получены для значений τ выше среднего значения (для периода 1980–2018 гг.). Отмеченные особенности связаны с различиями в разных фазах ключевых мод климатической изменчивости. В частности, среднее значение приповерхностной температуры СП зимой в положительной фазе АМО в пределах анализируемого периода 1980–2018 гг. значительно превышало соответствующее среднее значение T в отрицательной фазе АМО. При этом получено, что среднее значение продолжительности зимних атмосферных блокирований в СП положительной фазе АМО в полтора раза больше, чем в отрицательной фазе АМО. Для зимних сезонов получены также оценки связи τ с интенсивностью Арктического антициклонического ЦДА, зависящие от фазы АМО.

Для характеристики суммарной активности атмосферных блокирований для протяженных областей на разных временных интервалах в (Мохов, Тимажев, 2022) предложен новый интегральный индекс. Интегральный индекс, характеризующий долю площади с атмосферным блокированием в конкретной области в течение определенного временного интервала, использовался в двух версиях – одномерной и более детальной – двухмерной. С использованием данных реанализа для 4 десятилетий (1979–2018 гг.) получены оценки степени общей подверженности российских регионов и СП в целом действию атмосферных блокирований в разные сезоны и в среднем за год (табл. 3).

Наибольшие значения интегрального индекса, зависящего от частоты, длительности и размеров атмосферных блокировок для России и СП в целом получены для летнего сезона. Наибольшая межгодовая изменчивость проявляется в зимние сезоны. С использованием кросс-вейвлетного анализа отмечены суще-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ственные различия когерентности межгодовых вариаций интегрального индекса для российских регионов и для СП в целом для разных сезонов. При этом проявляется их значимая когерентность для наиболее долгопериодных (междесятилетних) вариаций сезонных значений интегрального индекса, за исключением весенних сезонов (Мохов, Тимажев, 2022).

Табл. 3. Среднегодовые и среднесезонные оценки коэффициентов линейной регрессии K_1 и корреляции r для значений интегрального индекса блокирования в России и СП в целом с использованием одномерного и двухмерного интегральных индексов блокирования для 40-летнего периода (1979–2018 гг.). В скобках приведены СКО

Интегральный индекс блокирования	Временной интервал	Коэффициент линейной регрессии K_1 (\pm СКО)	Коэффициент корреляции r
Одномерный	Год	0.8 (\pm 0.08)	0.71
	Зима	1.2 (\pm 0.11)	0.86
	Весна	0.9 (\pm 0.10)	0.82
	Лето	1.1 (\pm 0.12)	0.83
	Осень	1.0 (\pm 0.13)	0.79
Двухмерный	Год	0.9 (\pm 0.06)	0.78
	Зима	0.9 (\pm 0.10)	0.83
	Весна	0.9 (\pm 0.11)	0.77
	Лето	0.6 (\pm 0.08)	0.77
	Осень	1.0 (\pm 0.13)	0.78

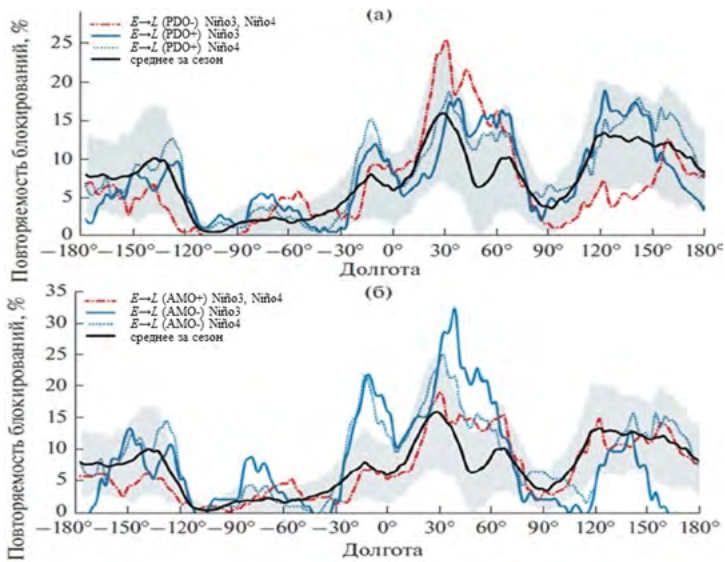


Рис. 7. Повторяемость летних атмосферных блокирований в зависимости от долготы в СП по данным для периода 1979–2019 гг. при фазовых переходах $E \rightarrow L$ при использовании индекса Niño3 (сплошные линии) и Niño4 (пунктир): (а) в положительной (синий цвет) и отрицательной (красный цвет) фазах PDO и (б) в положительной (красный цвет) и отрицательной (синий цвет) фазах АМО. Черные кривые характеризуют средние значения летней повторяемости блокирований для периода 1979–2019 гг. с заштрихованным диапазоном средноквадратических отклонений

В (Мохов, Тимажев, 2022; Mokhov, Timazhev, 2022) представлены оценки региональных аномалий повторяемости атмосферных блокирований в Северном полушарии, диагностированных по данным реанализа с 1979 г. при разных фазовых переходах явлений Эль-Ниньо в различных фазах АМО и PDO. На рис. 7 представлены оценки повторяемость летних атмосферных блокирований в зависимости от долготы в СП по данным для периода 1979–2019 гг. при фазовых переходах $E \rightarrow L$ – для лет, начинающихся в фазе Эль-Ниньо (E) и заканчивающихся в фазе Ла-Нинья (при использовании индексов Nino3 и Nino4) в положительных и отрицательных фазах PDO и АМО. Отмечены существенные различия для явлений Эль-Ниньо, диагностированных с использованием разных индексов, характеризующих процессы разного типа.

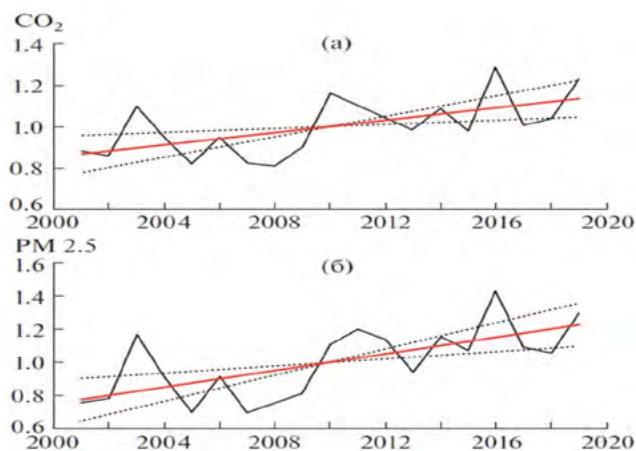


Рис. 8. Межгодовые изменения плотности эмиссий CO_2 (а) и $\text{PM}_{2.5}$ (б), а также отношения эмиссий CO и $\text{PM}_{2.5}$ (в). Все величины нормированы на средние значения для периода 2001–2019 гг. Прямые характеризуют соответствующие линейные тренды, пунктиром отмечены их 95%-ные доверительные интервалы

С использованием спутниковых данных и данных реанализа в (Мохов и др., 2020) получены оценки значимой связи площадей природных пожаров и вызванных ими эмиссий в воздушную среду продуктов горения с атмосферными блокированиями на территории России за период времени с 2001 по 2019 г. (см. также (Бондур и др., 2020)). Установлено, что вклад в дисперсию межгодовых изменений площадей пожаров и потоков продуктов горения в атмосферу, связанный с атмосферными блокированиями, может достигать и даже превышать 40%. Выявлена тенденция увеличения плотности эмиссий продуктов горения в атмосферу, в том числе углекислого и угарного газов, а также мелкодисперсного аэрозоля, на фоне общего уменьшения площадей природных пожаров в первое 20-летие 21 века (рис. 8).

В связи с необходимостью выполнения условий Парижского соглашения по изменениям климата особо значимы, наряду с антропогенными эмиссиями парниковых газов в атмосферу, количественные оценки естественных потоков для

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

российских регионов, в том числе с учетом пожаров. В (Денисов и др., 2019, 2022; Denisov, Mokhov, 2023) проанализированы естественные потоки CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в 21 веке с использованием результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей международного проекта CMIP6. Оценки естественных потоков CO_2 для регионов России сильно различаются для разных моделей (рис. 9). Оценки естественных выбросов метана в атмосферу с территории России также сильно различаются для разных моделей. Для большинства моделей характерен максимум поглощения CO_2 наземными экосистемами и дальнейшее его снижение к концу XXI века, тогда как естественные выбросы метана в атмосферу для всех моделей и сценариев антропогенного воздействия растут на протяжении всего XXI века.

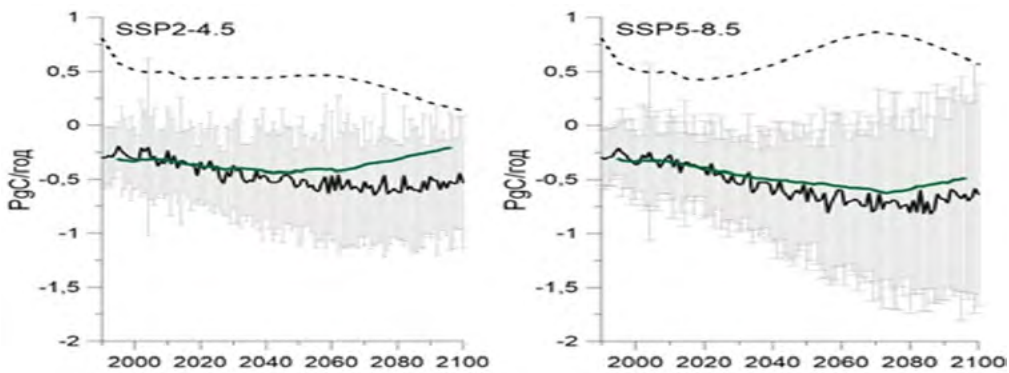


Рис. 9. Естественные потоки CO_2 в атмосферу в регионах России, рассчитанные по ансамблю моделей CMIP6 (средние значения и стандартное отклонение) в сравнении с потоками CO_2 , рассчитанными с использованием модели ИФА РАН (зеленая линия), и антропогенными выбросами в атмосферу (пунктирная линия) при различных сценариях (SSP2-4.5 SSP5-8.5) антропогенных воздействий в XXI веке

Формирование региональных погодно-климатических аномалий и их предсказуемость на фоне глобальных и региональных климатических трендов зависят от проявления ключевых мод межгодовой и междесятилетней изменчивости (Мохов, 2022а; Ранькова и др., 2022). Так, формированию рекордного амурского наводнения в 2013 г. и камчатского «красного прилива» в 2020 г. способствовали положительные аномалии температуры в северо-западной части Тихого океана, соответствующие отрицательной фазе PDO. С режимами этого колебания связаны крупномасштабные климатические вариации типа «климатического сдвига» во второй половине 1970-х годов, отмечена связь с особенностями атмосферных блокирований. Рекордный по продолжительности период атмосферного блокирования над европейской территорией России летом 2010 г. с рекордной жарой и пожарами был отмечен в отрицательной фазе PDO в год перехода из фазы Эль-Ниньо (*E*) в фазу Ла-Нинья (*L*) - *E*→*L* (Мохов, 2021).

В (Мохов, 2020; Mokhov, 2023) получены оценки вероятности экстремально теплых (ЭТ), значительно теплых (ЗТ) и умеренно теплых (УТ), а также экстре-

мально холодных (ЭХ), значительно холодных (ЗХ) и умеренно холодных (УХ) зим (январь-февраль) в разных российских регионах, включая Прибайкалье и Забайкалье (табл. 4) и Европейскую часть России (табл. 5) по данным для периода 1936-2014 гг. (Мещерская, Голод, 2015) в фазах Эль-Ниньо (*E*), Ла-Нинья (*L*) и нейтральной (*N*) характеризующихся индексами Nino3 и Nino4.

Табл. 4. Оценки вероятности экстремально теплых (ЭТ), значительно и экстремально теплых (ЭТ+ЗТ) и в целом теплых (экстремально, значительно и умеренно теплых - ЭТ+ЗТ+УТ), а также экстремально холодных (ЭХ), значительно и экстремально холодных (ЭХ+ЗХ) и в целом холодных (экстремально, значительно и умеренно холодных - ЭХ+ЗХ+УХ) зим (январь-февраль) в Прибайкалье и Забайкалье (южнее 60° с.ш.) по данным для периода 1936-2014 гг. в фазах Эль-Ниньо (*E*), Ла-Нинья (*L*) и нейтральной (*N*), характеризующихся индексами Nino3 и Nino4

1936-2014 гг.		Прибайкалье и Забайкалье					
		тёплые зимы			холодные зимы		
		ЭТ	ЭТ+ЗТ	ЭТ+ЗТ+УТ	ЭХ	ЭХ+ЗХ	ЭХ+ЗХ+УХ
Nino3	<i>N</i>	4/44	17/44	22/44	5/44	11/44	22/44
	<i>L</i>	4/19	8/19	11/19	0/19	0/19	8/19
	<i>E</i>	0/16	1/16	4/16	3/16	8/16	12/16
Nino4	<i>N</i>	3/40	13/40	16/40	7/40	13/40	24/40
	<i>L</i>	3/18	8/18	12/18	0/18	0/18	6/18
	<i>E</i>	2/21	5/21	9/21	1/21	6/21	12/21

Табл. 5. Оценки вероятности экстремально теплых (ЭТ), значительно и экстремально теплых (ЭТ+ЗТ) и в целом теплых (экстремально, значительно и умеренно теплых - ЭТ+ЗТ+УТ), а также экстремально холодных (ЭХ), значительно и экстремально холодных (ЭХ+ЗХ) и в целом холодных (экстремально, значительно и умеренно холодных - ЭХ+ЗХ+УХ) зим (январь-февраль) в Европейской части России (южнее 60° с.ш.) по данным для периода 1936-2014 гг. в фазах Эль-Ниньо (*E*), характеризующихся индексами Nino3 и Nino4

1936-2014 гг.		Европейская территория России					
		тёплые зимы			холодные зимы		
		ЭТ	ЭТ+ЗТ	ЭТ+ЗТ+УТ	ЭХ	ЭХ+ЗХ	ЭХ+ЗХ+УХ
Nino3	<i>E</i>	1/16	5/16	11/16	0/16	1/16	5/16
Nino4	<i>E</i>	2/21	6/21	15/21	2/21	3/21	6/21

Согласно табл. 4 по данным для 1936-2014 гг. в фазе *L*, как в 2021-2023 гг., ни разу не были отмечены экстремально и значительно холодные январь и февраль в Прибайкалье и Забайкалье. При этом в фазе *E*, как в 2024 г., частота холодных январей и февралей в Прибайкалье и Забайкалье существенно больше, чем теплых. В фазе *E*, как в 2024 г., частота теплых январей и февралей в европейских регионах России существенно - более, чем вдвое, превышает вероятность холодных. Согласно табл. 5 в фазе *E*, как в 2024 г., вероятность теплых январей и февралей в европейских регионах России существенно - более, чем вдвое, превышает вероятность холодных. Отмеченные особенности существенны с точки зрения

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

предсказуемости региональных аномалий. Проявляются различия аномальных режимов при явлениях Эль-Ниньо разного типа.

В (Mokhov, 2024) представлены оценки высокой вероятности высокой температуры и режима засухи на европейской территории России в весенне-летние месяцы 2024 г. в связи формированием к концу 2023 г. фазы Эль Ниньо в экваториальных широтах Тихого океана с переходом в фазу Ла Нинья к концу 2024 г. Вероятность подобного перехода, как в 2010 г. с рекордной жарой и пожарами в европейских российских регионах, оценивалась высокой с заблаговременностью в несколько месяцев – до полугода и более - уже к январю 2024 г. она была около 80%. При этом риск формирования региональной почвенной засухи зависит от режима снежного покрова в предшествующую зиму.

Следует отметить, что на фоне глобальных изменений климата изменяются и режимы ключевых мод климатической изменчивости, включая явления Эль Ниньо, АМО, PDO и др., и блокинговая активность в атмосфере, что значимо проявляется в региональных аномалиях. При этом существенно различаются тенденции изменения явлений Эль-Ниньо разного типа в последние десятилетия (Мохов, 2022в). В связи с этим изменяется и потенциальная предсказуемость соответствующих региональных климатических аномалий.

Климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных явлений, но и о проявлении новых процессов и явлений, характеризующих достижение определенного критического уровня происходящих климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учетом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления у поверхности в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена. Особенно сильные изменения отмечены в арктических широтах. При этом современные климатические модели способны адекватно воспроизводить не только средние глобальные и региональные режимы и тенденции их изменений, но и особенности их изменчивости.

Приведенные оценки значимы как с точки зрения количественного определения региональных климатических трендов, аномалий и последствий, так и их предсказуемости. В связи с экстремальными погодно-климатическими режимами, в том числе сибирскими пожарами последних лет, аномальной жарой в европейской части России летом 2010 года, рекордными наводнениями на Амуре в 2013 году, на Урале в 2024 году и в других речных бассейнах на фоне общего быстрого потепления в российских регионах, особенно в высоких широтах, с уменьшением протяженности морских льдов в Арктическом бассейне и деградацией «вечной» мерзлоты необходимо менять многие нормативы и критерии. Необходимо стратегически оценивать и решать проблемы адаптации и регулирования не только в связи с негативными последствиями, но и с учетом новых возможностей, включающих перспективы навигации и работы на шельфе в арктическом бассейне, увеличение вегетационного периода, более теплые зимы и др. Для решения проблем пространственного развития страны наряду с систе-

мой оценки рисков, связанных с долгопериодными изменениями климата, необходимо развитие общей системы взаимно-согласованных региональных оценок предсказуемости сезонных климатических аномалий на фоне межгодовой и междесятилетней изменчивости (Мохов, 2022).

Представленные результаты получены в рамках проекта 24-17-00211 РНФ с использованием результатов, полученных в рамках проекта 23-47-00104.

Литература

1. Акперов М.Г. и др. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18-29.
2. Бондур В.Г. и др. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99-106.
3. Денисов С.Н. и др. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // ДАН. Науки о Земле. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.
4. Денисов С.Н. и др. Модельные оценки вклада естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России, Китая США и Канады в глобальные изменения климата в 21 веке // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18-32.
5. Мещерская А.В., Голод М.П. Каталоги аномальности зим на территории России // Тр. ГГО. 2015. Вып. 579. С. 129–161.
6. Мохов И.И. Аномальные зимы в регионах Северной Евразии в разных фазах явлений Эль-Ниньо // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 93-98.
7. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник Российской академии наук. 2022а. Т. 92. № 1. С. 3-14. DOI 10.31857/S0869587322010066.
8. Мохов И.И. Аналитические условия формирования Арктического усиления в Земной климатической системе // ДАН. Науки о Земле. 2022б. Т. 505. № 1. С. 102-107.
9. Мохов И.И. Изменения частот фазовых переходов разных типов явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022в. Т. 58. № 1. С. 3-9.
10. Мохов И.И. Зимние атмосферные блокирования в Северном полушарии при климатических изменениях последних десятилетий (1980-2018 гг.) // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 132-138.
11. Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокированиями // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 61-66.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

12. Мохов И.И., Макарова М.Е., Порошенко А.Г. Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические: оценки полувековых тенденций изменения // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 83-88.

13. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979-2020 гг. // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 71-77.

14. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 48-54.

15. Мохов И.И., Тимажев А.В. Повторяемость летних атмосферных блокировок в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 239-249.

16. Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокировок в Северном полушарии в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 1-10.

17. Мурышев К.Е. и др. Взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // Доклады АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 708-712.

18. Парфенова М.Р. и др. Изменения периода навигации на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118-125.

19. Ранькова Э.Я., Алексеев Г.В., Алешина М.А. и др. Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 1. С. 5-50.

20. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб: Научное издание. 2022. 124 с.

21. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27-41.

22. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson Delmotte V., et al. (eds.), Cambridge Univ. Press, 2021.

23. Denisov S.N., Mokhov I.I. Natural sinks and sources of CO₂ and CH₄ in the atmosphere of Russian regions and their contribution to climate change in the 21st century as calculated with CMIP6 model ensemble // arXiv. 2023. 2312.17001. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2312/2312.17001.pdf>

24. Mokhov I.I. Assessment of El Niño effects in the North Eurasian regions: predictability of warm and cold winters // arXiv. 2023. 2312.16538. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2312/2312.16538.pdf>

25. Mokhov I.I. Predictability of climate anomalies in the regions of Northern Eurasia in the spring-summer months in 2024 in connection with El Nino // arXiv. 2024. arXiv:2404.00453 [physics.ao-ph]

26. Mokhov I.I., Smirnov D.A. Contributions to surface air temperature trends estimated from climate time series: Medium-term causalities // Chaos. 2022. V. 32. P. 063128. <https://doi.org/10.1063/5.0088042>

27. Muryshev K.E. et al. Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing // Glob. Planet. Change. 2017. V. 148. P. 29-41.

МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ГРУППА ЭКСПЕРТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА (МГЭИК): ИТОГИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С.М. Семенов

*Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля
SergeySemenov1@yandex.ru*

Аннотация. В Шестом оценочном цикле (2015-2023 гг.) Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) подготовила и выпустила основной, оценочный доклад в трех томах, три специальных доклада, один методологический доклад, а также обобщающий, Синтезирующий доклад. Эти публикации суммировали данные, имеющиеся в научной литературе и глобальных базах данных мониторинга и моделирования и сформулировали заключения и выводы, важные для дальнейшей разработки климатической политики на международном и национальном уровнях. Российские ученые активно участвовали в работе МГЭИК в качестве авторов и редакторов-рецензентов. В Шестом оценочном цикле выявились также определенные методологические проблемы, накопившиеся за более чем тридцатилетний срок работы этой международной научной неполитической организации.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, глобальный климат, изменения

Введение

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), – международная неполитическая научная организация. Она создана в 1987-1988 гг. совместно Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (UNEP). Ее членами являются 195 стран. Она не проводит собственных исследований, а анализирует и обобщает информацию, имеющуюся в научной литературе, необходимую для принятия решений в области регулирования воздействия человека на климат Земли. Эта информация касается величины и сроков изменений климата – естественных и вызванных деятельностью человека (антропогенных), их воздействий на природные и социально-экономические си-

стемы, на здоровье населения, а также возможностей снизить возникающие риски путем митигации – ограничения воздействия человека на глобальный климат (борьба с причинами изменений климата) и адаптации систем (борьба с негативными последствиями изменения климата). Информация периодически представляется МГЭИК в форме научных докладов. Эти доклады находятся в свободном доступе на сайте www.ipcc.ch.

Главнейший принцип работы МГЭИК, как международной научной неполитической организации, следующий: ***ее доклады должны быть политически значимы, но политически нейтральны, и никогда не предписывать политику*** (IPCC reports are policy relevant, yet policy neutral, never policy prescriptive). Следует иметь в виду, что в данном контексте слово «политика» (*англ.* policy) в большей мере означает «программа действий». МГЭИК проводит анализ и обобщение суммы знаний, на основе которых можно разрабатывать программу действий в области воздействия человека на климат. Основа докладов – ТОЛЬКО научные публикации, данные мониторинга и моделирования. В 2007 г. МГЭИК была присуждена Нобелевская премия мира за «усилия по наращиванию и распространению большего знания об антропогенном изменении климата и формированию основ для мер, которые необходимы для противостояния этому изменению».

Работа МГЭИК во времени организована по циклам продолжительностью 5-7 лет. В течение каждого такого цикла оценки подготавливаются и выходят в свет научные доклады, в которых приводятся как обновленные и дополненные данные по традиционным направлениям, так и рассматриваются новые аспекты проблемы изменения климата. В 2023 г. МГЭИК закончила работать над всеми докладами Шестого цикла оценки (2015-2023 гг.). Научные доклады, подготовленные и принятые в этом цикле – последняя наиболее авторитетная глобальная сводка по проблеме изменения климата. Около 20 российских ученых работали над докладами этого цикла в качестве авторов и редакторов-рецензентов. Значительное число также участвовало в научных семинарах, которые были организованы МГЭИК. Они были посвящены различным научным вопросам, связанным с задачами последнего цикла работы МГЭИК.

Ниже приводится информация – в весьма обобщенном виде – об основных заключениях научных докладов МГЭИК Шестого цикла оценки, а также о ряде проблем в работе этой организации, назревших за более чем 30 лет ее существования, и возможных путях их решения.

Основные заключения Шестого цикла оценки МГЭИК, значимые для разработки климатической политики

Основные вопросы, на которые отвечают научные доклады МГЭИК (жанр – коллективные монографии, книги):

- Какие изменения климата уже произошли за индустриальную эпоху (условно – с 1850-1900 гг.), в последние десятилетия?

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

- Какие изменения климата ожидаются при различных сценариях развития мирового хозяйства в будущем, в XXI веке?

- Каковы их последствия для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения?

- Какие существуют меры адаптации (ответные стратегии, уменьшающие отрицательные последствия и усиливающие положительные последствия)?

- Какие существуют возможности смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему Земли?

Этим вопросам посвящены доклады Шестого цикла работы МГЭИК (2015-2023 гг.). Был подготовлен основной, оценочный доклад. Этот доклад состоит из трех томов: «Физическая научная основа» (2021 г.), «Воздействия, адаптация и уязвимость» (2022 г.) и «Смягчение изменения климата» (2022 г.). Над ними работают Рабочие группы I, II и III МГЭИК соответственно. Каждый из этих томов снабжен «Резюме для политиков» и «Техническими резюме».

Кроме этого, МГЭИК также подготовила три специальных доклада и один методологический доклад.

Были изданы следующие специальные доклады:

- Специальный доклад «Глобальное потепление на 1.5°C (2018 г.);

- Специальный доклад «Океан и криосфера в меняющемся климате» (2019 г.);

- Специальный доклад «Изменение климата и земли» (2019 г.).

Эти доклады также снабжены Резюме для политиков, а два последних – и Техническим резюме.

Был подготовлен методологический доклад – «Обновление 2019 г. Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г.» (2019 г.).

И, наконец, «Синтезирующий доклад», обобщающий наиболее существенные выводы и заключения все докладов МГЭИК Шестого цикла оценки, был подготовлен и принят в 2023 г.

Приведем ниже в этом разделе в очень кратком и обобщенном виде те выводы и заключения этих докладов, которые могут иметь высокую значимость для политиков и их советников по науке, для участников международного переговорного процесса по климату.

Средняя глобальная температура в приповерхностном слое в 2011-2020 гг. превысила доиндустриальный уровень (1850-1900 гг.), на 1.1°C (IPCC, 2023). Как показано на рис. 1 (IPCC, 2021), это повышение не объясняется без учета глобальных антропогенных воздействий на климатическую систему Земли.

Более того, расчеты показывают (см. рис. 2), что наблюдаемое потепление практически полностью объясняется изменением содержания в атмосфере парниковых газов и некоторых других климатически активных веществ (IPCC, 2021). Среди этих веществ есть как способствующие потеплению за счет усиления парникового эффекта (это в основном парниковые газы), так и способствующие похолоданию вследствие увеличения альбедо атмосферы. Роль солнечных и вулканических факторов невелика.

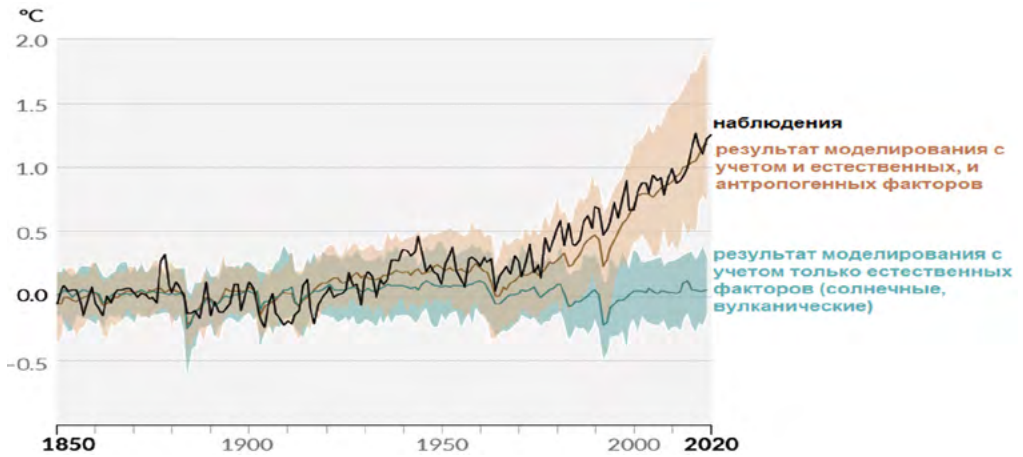


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры в приповерхностном слое в 1850-2020 гг. (IPCC, 2021)

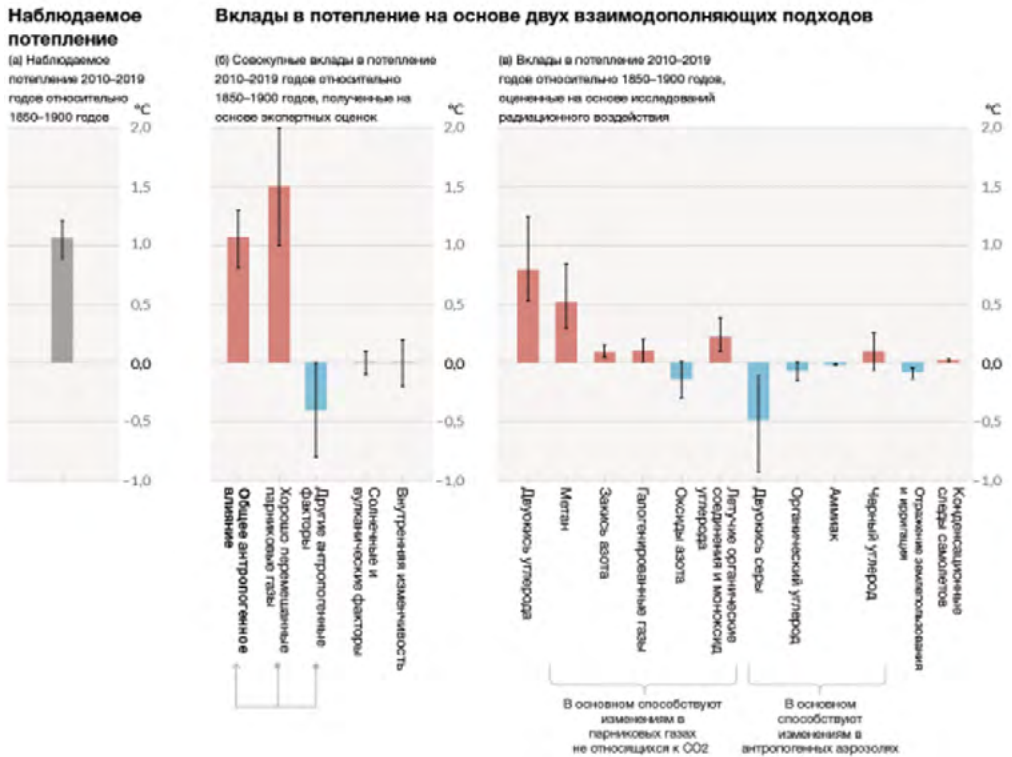


Рис. 2. Наблюдаемое потепление в 2010-2019 гг. по сравнению с 1850-1900 гг. и расчетные вклады различных факторов (IPCC, 2021)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Произошедшие изменения климата по отношению к базовому периоду 1850-1900 гг. заметно неоднородны в пространстве. На рис. 3 (IPCC, 2021) представлены изменения а) среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}$), б) годовой суммы осадков (%) и в) содержания влаги в почвенной колонне (в единицах стандартного отклонения) в расчете на 1.5°C глобального потепления. Потепление в большей мере выражено в высоких широтах Северного полушария, уменьшение содержания влаги в почве – в низких широтах Северного полушария и в Южном полушарии.

Изменения климата затрагивают практически все населенные регионы мира и оказывают в основном негативное влияние на природные и хозяйственные системы, на здоровье людей. Так (IPCC, 2021), практически повсеместно усиливается экстремальность температурного режима, причем имеется достаточно высокая уверенность в наличии антропогенной компоненты в этом усилении. В 19 обширных регионах Северной и Южной Америки, Евразии, Африки и Австралии наблюдается усиление увлажнения, хотя уверенность в наличии в этом антропогенной составляющей в основном низкая (примерно в таком же числе регионов данных для оценки недостаточно или же между существующими оценками имеется низкое согласие). В 12 крупных регионах, в основном, Африки и Евразии усиливается засушливость.

Оценки, полученные с помощью математических моделей, указывают на ряд конкретных негативных последствий, связанных с дальнейшим глобальным потеплением. Так (IPCC, 2022a), в некоторых обширных регионах будут возрастать риски утраты биологического разнообразия, негативного влияния на здоровье людей в связи с комбинированным воздействием факторов жары и влажности, уменьшения уловов рыбы и урожаев кукурузы.

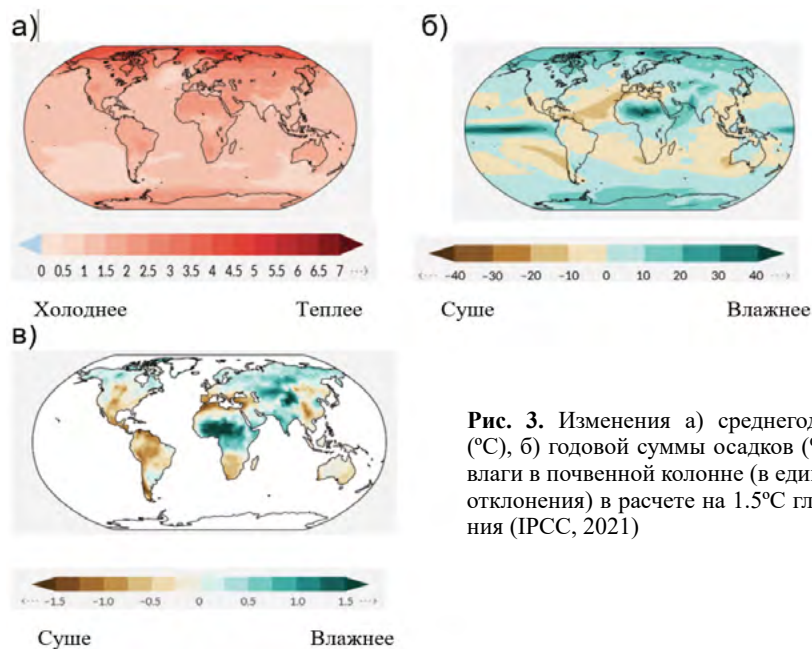


Рис. 3. Изменения а) среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}$), б) годовой суммы осадков (%) и в) содержание влаги в почвенной колонне (в единицах стандартного отклонения) в расчете на 1.5°C глобального потепления (IPCC, 2021)

Климат будущего, в том числе климат нашего столетия критически зависит от глобальных антропогенных эмиссий парниковых газов и других климатически активных веществ. Траектории этих эмиссий определяются ходом развития мирового хозяйства, что невозможно прогнозировать на столетие и большие промежутки времени. Поэтому такой анализ возможен только в рамках определенных сценариев развития мировой экономики.

Такие сценарии были разработаны несколькими группами исследователей. Их объединенное название – «общие социально-экономические пути» развития (SSP – shared socio-economic pathways). Основных групп таких сценариев пять: SSP1 (van Vuuren et al., 2017), «зелёное» развитие; SSP2 (Fricko et al., 2017), промежуточный сценарий; SSP3 (Fujimori et al., 2017), неравенство между странами; SSP4 (Calvin et al., 2017), неравенство внутри стран; SSP5 (Kriegler et al., 2017), использование ископаемого топлива. Соответствующую библиографию можно найти в работе (Семенов, Гладильщикова, 2022). На самом деле этими символами обозначаются целые группы сценариев, которые могут различаться уровнями радиационного воздействия в конце XX века. В этом случае к символу группы сценариев (например, SSP1) прибавляется уровень радиационного воздействия в Вт·м⁻² (например, SSP1-2.6).

Анализ показал (IPCC, 2021), что достижение климатических глобальных температурных целей, обозначенных в Парижском соглашении, а именно не превышения глобальной средней температурой воздуха в приповерхностном слое уровней 1.5 и 2°C, возможно лишь в условиях сценариев группы SSP1 (см. рис. 4а). Они соответствуют «зеленой», низкоуглеродной мировой экономике, а именно, достижению *нулевых или даже отрицательных антропогенных нетто-эмиссий CO₂* и радикальных сокращений антропогенных эмиссий остальных парниковых газов к 2050 и 2070 годам соответственно (см. рис. 4б).

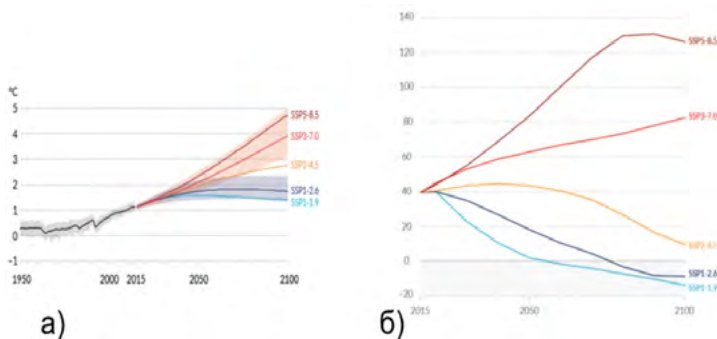


Рис. 4. В условиях различных сценариев семейства SSP а) изменение средней температуры (°C) в приповерхностном слое в 1950-2100 гг. относительно уровней 1850-1900 гг. и б) глобальные антропогенные эмиссии CO₂ (Гт·год⁻¹) в 2015-2100 гг. (IPCC, 2021)

Сохранение современных объемов глобальных антропогенных эмиссий парниковых газов приведет к превышению уровня глобального потепления 1.5°C *уже в начале 2030-х годов.*

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Дальнейшее потепление сопряжено с ростом рисков для природных и антропогенных систем, для здоровья населения. При этом чаще всего современное глобальное потепление наносит больший ущерб тем странам, которые на глобальный климат воздействуют в меньшей степени.

Митигация (уменьшение антропогенных воздействий на климатическую систему – борьба с причинами изменения климата) и адаптация (в основном, уменьшение негативных последствий изменения климата – борьба с последствиями) – два основных направления решения проблемы глобального климата. Хотя адаптационные программы реализуются во многих странах, их реализация не всегда обеспечена достаточными ресурсами; кроме того, при продолжении глобального потепления возможности адаптации будут постепенно исчерпываться.

Меры митигации и адаптации к изменению климата в большинстве случаев не противоречат Целям устойчивого развития ООН, *но все же в некоторых случаях наблюдается несоответствие* («отрицательная взаимосвязь», trade-off), чего можно избежать только с помощью тщательного планирования.

Реализация программ митигации и адаптации требует решения в ходе международного переговорного процесса по климату комплекса сложных задач, связанных, в том числе, с доступностью низкоэмиссионных технологий для развивающихся стран, с климатической справедливостью, с обеспечением устойчивого развития всех стран.

Проблемы и возможности их разрешения

МГЭИК является наиболее авторитетной организацией в своей области. В 2007 г. ей была присуждена Нобелевская премия мира. «Принципы, управляющие работой МГЭИК», заложенные правительствами стран-членов этой организации, определяют доверие стран к результатам ее работы.

Однако к настоящему времени в ее деятельности обозначился ряд проблем, разрешение которых требует повышенного внимания МГЭИК уже в Седьмом цикле ее работы, начавшемся в 2023 г. Укажем на некоторые из них и обозначим возможности решения этих проблем.

Сценарии. Следствием принятой концепции сценария является потенциальная неполнота их совокупности. Это касалось и первых сценариев, использованных МГЭИК, и последних – SRES, RCP и SSP. Вероятности реализации каждого из рассматриваемых сценариев не заданы. Ниоткуда не следует, что это – наиболее вероятные пути мирового развития. В то же время, на основе их анализа делаются иногда весьма драматические выводы об изменении глобального климата в будущем.

Возможное разрешение проблемы – повышение требований к разработчикам сценариев, в том числе в отношении storylines – исходных технологических, экономических и политических предположений. Важно считать обязательными назначение сценариям их вероятностей и вероятностную полноту их анализиру-

емой совокупности. Это должно достигаться в ходе совместной работы Рабочих групп I и III МГЭИК с теми международными коллективами исследователей, которые занимаются созданием сценариев.

Атрибуция. В результатах расчета с помощью динамических моделей и результатах расчета, основанного на методологии, принятой в документах Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), в некоторых случаях наблюдаются существенные различия в оценках антропогенной составляющей некоторых процессов, протекающих в земной системе.

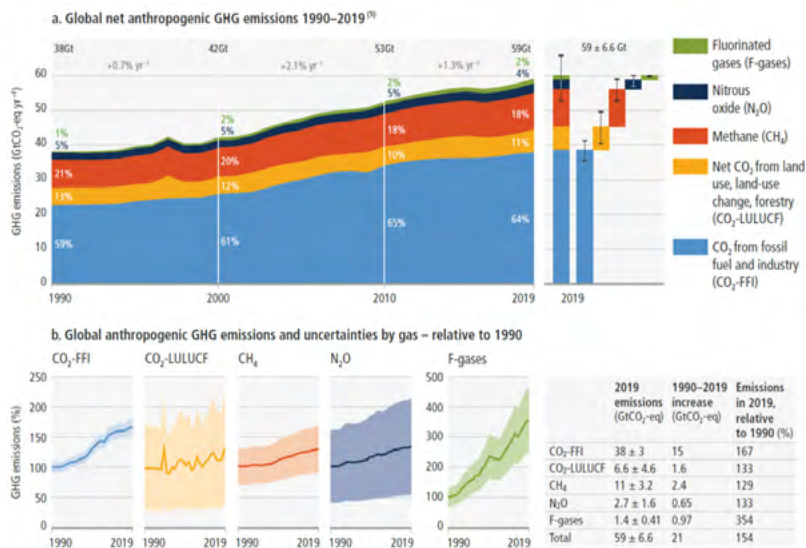


Рис. 5. а) Глобальные антропогенные эмиссии парниковых газов в 1990-2019 гг., Гт CO₂-экв.; б) то же отдельно для CO₂, CH₄, N₂O и фторсодержащих газов – центральные оценки и диапазон неопределенности (IPCC, 2022b)

Это касается, в частности, антропогенных потоков парниковых газов (последние данные представлены на рис. 5). Например, для 2005-2014 гг. глобальная оценка нетто-эмиссий (↑) из AFOLU, полученная по данным национальных инвентаризаций, была 0.1 ± 1.0 Гт CO₂ · год⁻¹, а глобальное моделирование показало значение 5.1 ± 2.6 Гт CO₂ · год⁻¹ (Jia et al., 2019, раздел 2.3.1.2). Как указано в работе (Grassi, G. et al., 2018), причина расхождения – в различном понимании термина «управляемые леса» при использовании глобальных динамических моделей растительности и в отчетности по РКИК ООН. Таким образом, это – проблема атрибуции, а именно отнесения некоторых потоков CO₂ к антропогенным или естественным.

Целесообразно, чтобы Рабочая группа I МГЭИК совместно с Целевой группой по кадастрам уделили специальное внимание теории и практике атрибуции.

Особенно важно предложить четкие принципы сохранения и изменения «принадлежности» вещества при межсредовом переносе и трансформации.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

а)

Категория	Вероятность события, %
Практически определено	99 - 100
Весьма вероятно	90 - 100
Вероятно	66 - 100
Столь же вероятно, сколь нет	33 - 66
Маловероятно	0 - 33
Весьма маловероятно	0 - 10
Исключительно маловероятно	0 - 1

б)

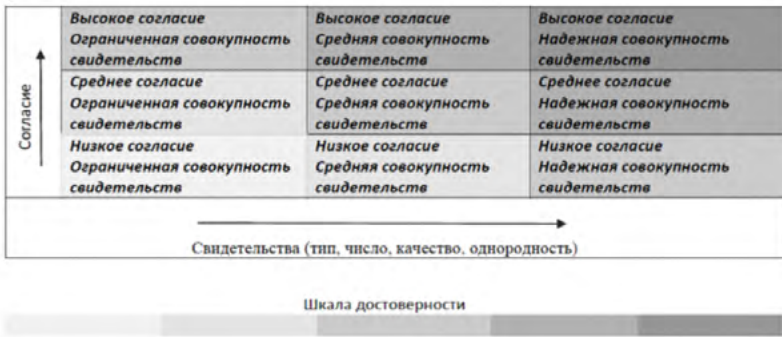


Рис. 6. а) Количественная шкала неопределенности, основанная на понятии вероятности;
б) качественная шкала неопределенности, основанная на понятии достоверности/уверенности (Mastrandrea et al., 2010)

Неопределенность оценок. При обобщении данных совокупности научных публикаций для учета имеющихся различий МГЭИК использует два подхода к оценке неопределенности: количественный, основанный на понятии вероятности (likelihood) и качественный, основанный на понятии достоверности/уверенности (confidence). Соответствующие шкалы представлены на Рис. 6.

Последний подход основан на экспертных оценках, т.е. в значительной мере субъективен. Результаты применения таких двух подходов сложно сравнивать. Необходима унификация методов оценки неопределенности в направлении количественных подходов. Кроме того, количественную шкалу целесообразно немного изменить – использовать градации [99, 100), [90, 99), [66, 90), [33, 66), [10, 33), [1, 10), [0, 1). К этой работе целесообразно привлечь Рабочие группы I и II МГЭИК. Их совместная работа должна привести к обновлению руководства по оценке неопределенности 2010 г. (Mastrandrea et al., 2010).

Визуализация изменений риска. При обобщении данных о рисках, возникающих или усиливающихся при изменениях климата, в том числе при нарастании глобального потепления часто используется техника «диаграмм тлеющих углей» (англ. burning embers diagrams). Это – удобный способ визуализации увеличения рисков. Пример приведен на рис. 7.

На рис. 7 каждый столбец относится к одной из пяти категорий объектов/процессов: RFC1 – уникальные и угрожаемые системы, RFC2 – экстремальные по-

годные явления, RFC3 – распределение воздействий, RFC4 – глобально-агрегированные воздействия, RFC5 – широкомасштабные сингулярные явления. Цвета означают: белый – риск не определяется, желтый – умеренный риск, красный – высокий риск, пурпурный – очень высокий риск. Точки означают уверенность в местоположении границы перехода: • – низкая, •• – средняя, ••• – высокая, •••• – очень высокая. Серым цветом обозначен рост средней глобальной температуры в 2011-2020 гг. по отношению к 1850-1900 гг.: пунктир – среднее значение 1.09°C, серая полоса – доверительный диапазон 0.95-1.20°C.

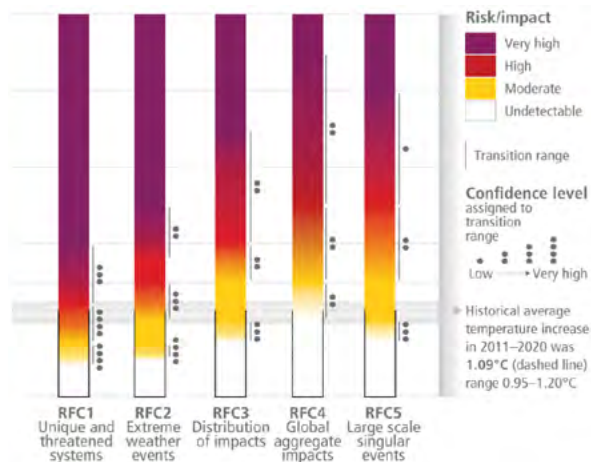


Рис. 7. Представление нарастания рисков при глобальном потеплении для пяти категорий объектов/процессов, в отношении которых есть причины для беспокойства – RFC, reasons for concern (IPCC, 2022a)

Такой способ обобщенного представления информации, взятой из множества разных источников, удобный и наглядный. Однако не существует никакого руководства по построению таких диаграмм. В каждом конкретном случае это – результат творческих усилий конкретной группы экспертов. Другая группа экспертов получит иной результат.

Необходимо разработать специальное руководство по построению «диаграмм тлеющих углей», которое имело бы характер алгоритма и исключало субъективный фактор при их построении. Эту работу целесообразно поручить Рабочим группам I и II МГЭИК. При этом Рабочая группа II могла бы обеспечить подобное руководство примерами категорий объектов/процессов, по которым есть данные в литературе, а Рабочая группа I – строгим математическим обоснованием процедуры построения диаграмм.

Заключение

Основной, Оценочный доклад, Специальные доклады и Методологический доклад, подготовленные МГЭИК в Шестом цикле оценки (2015-2023 гг.) – по-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

лезные издания и для ученых, и для разработчиков климатической политики. Это – сводки современных продвижений в науке об изменении климата и в фундаментальных, и в прикладных разделах.

Изменения климата (по сравнению с 1850-1900 гг.) обнаружены на всех обитаемых континентах, и их последствия затронули природные системы, социально-экономические системы и здоровье населения.

Наблюдаемые современные изменения температуры в приповерхностном слое по сравнению с периодом 1850-1900 гг. практически полностью объясняются обогащением атмосферы парниковыми газами в ходе хозяйственной деятельности.

Сохранение нынешних объемов глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу приведет в 2030-е годы к превышению доиндустриальных уровней глобальной температуры более чем на 1.5°C. Таким образом, температурная цель, декларированная в Парижском соглашении, не будет достигнута. Для ее достижения необходимы дальнейшие сокращения выбросов.

Возможности адаптации существенны, и национальные адаптационные планы реализуются во многих странах. В этом развивающиеся страны нуждаются в поддержке развитых. Однако при продолжении глобального потепления возможности адаптации будут постепенно исчерпываться.

Возросший объем работы по анализу и обобщению результатов научных исследований требует от МГЭИК проведения своей специфической научной работы по созданию методологии оценки этой информации, хотя собственно **предметные** научные исследования в мандат этой группы не входят. Разработку методологий оценки должны вести совместно все группы МГЭИК. При этом лидирующую роль в такой работе целесообразно поручить Рабочей группе I (как носителю наиболее строгих научных подходов) и в этом вопросе отойти от традиционного принципа «суверенности» Рабочих групп и Целевой группы по кадастрам МГЭИК.

Литература

1. Семенов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2022, Т. 8, № 1. С. 75-106, DOI 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106.

2. Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L. 2019: Land-climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>.

3. Grassi, G., House, J., Kurz, W.A., Cescatti, A., Houghton, R.A., Peters, G.P., Sanz, M.J., Viñas, R.A., Alkama, R., Arneth, A., Bondeau, A., Dentener, F., Fader, M., Federici, S., Friedlingstein, P., Jain, A.K., Kato, E., Koven, C.D., Lee, D., Nabel, J. E. M. S., Nassikasm A.A., Perugini, L., Rossi, S., Sitchm S., Vioy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S. 2018: *Reconciling global model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO₂ sinks*. Nat. Clim. Chang., 1–35.

4. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 39 pp., https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.

5. IPCC, 2022a: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lüscke, V. Müller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lüscke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf/.

6. IPCC, 2022b: Summary for Policymakers [P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R. Slade, R. Fradera, M. Pathak, A. Al Khourdajie, M. Belkacemi, R. van Diemen, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, D. McCollum, S. Some, P. Vyas, (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.

7. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

8. Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. 2010. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – Available at <http://www.ipcc.ch>.

НОВЫЕ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА В КОНТЕКСТЕ РЕАГИРОВАНИЯ РОССИИ НА ГЛОБАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

В.М. Катцов

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Росгидромет
director@voeikovmgo.ru*

Аннотация. Данные наблюдений, моделирования и прогнозирования состояния и изменений земной системы, а также воздействующих на нее факторов служат ключевой информационной основой для выработки, практической реализации и последующей оценки результативности национальной климатической политики – как внутренней, так и внешней – в отношении целей и путей, пределов и механизмов адаптации к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климат. Решению этих задач в значительной мере призвана содействовать Федеральная научно-техническая программа в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы (ФНТП). Этой программе синергичен Важнейший инновационный проект государственного значения, направленный на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ (ВИПГЗ).

Миссия ВИПГЗ-ФНТП – разработка и совершенствование инфраструктуры и технологий мониторинга и моделирования для получения международно признаваемых отечественных данных в области экологии и климата, включая созданные на их основе продукты. С 2022 г. ВИПГЗ-ФНТП реализуется силами шести консорциумов, объединяющих, примерно, полсотни научно-исследовательских и образовательных организаций по направлениям: (1) Земная система: моделирование и прогноз; (2) Океан: мониторинг и адаптация; (3) Суша: мониторинг и адаптация; (4) Углерод в экосистемах: мониторинг; (5) Экономика климата; (6) Антропогенные выбросы: кадастр. Обсуждаются задачи в рамках направления «Суша: мониторинг и адаптация».

Ключевые слова: климат, мониторинг, моделирование, обслуживание, адаптация

Введение

Изменения климата и ухудшение состояния природной среды относятся к крупнейшим вызовам для любого государства, бизнеса и общества. Вопросы изменений климата и экологического регулирования стали одним из главных элементов международных отношений.

Основой национальных действий в отношении климатического вызова является научное и информационно-аналитическое (базирующееся на данных мониторинга и моделирования земной системы) обеспечение планирования и мониторинга эффективности мер адаптации к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климат и окружающую среду (т.н. «митигации»), что в свою очередь в значительной степени определяет стратегии отраслевого и регионального развития страны, включая инвестиционную политику в различных сферах.

Сегодня мировые системы климатического мониторинга, функционируют и развиваются под эгидой международных организаций, таких как Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и Межправительственная океанографическая комиссия (МОК) ЮНЕСКО. В рамках Глобальной Системы Наблюдений за Климатом (ГСНК), Глобальной Системы Наблюдений Океана (ГСНО), Глобальной службы атмосферы (ГСА), Глобальной службы криосферы (ГСК) и других программ осуществляется широкий спектр наблюдений. Помимо собственно наблюдений, отдельными странами или группами стран применяются высокотехнологичные системы моделирования, позволяющие усваивать данные наблюдений и формировать в оперативном режиме глобальные ретроспективные анализы (реанализы) климатических характеристик атмосферы и океана, позволяющие в определенной мере восполнять отсутствующие данные наблюдений и таким образом составляющие основу для системы мониторинга климатических изменений.

На сегодняшний день все еще не преодолено отмечавшееся ранее (см. например, Росгидромет, 2011) отставание Российской Федерации от ведущих стран мира в области высокотехнологичных мониторинга и моделирования, а также основанных на использовании соответствующего отечественного инструментария научных исследований окружающей среды и климатических изменений – как глобальных, так и на территории нашей страны. Недостаток научно обоснованных данных о текущем и ожидаемом состояниях земной системы остается препятствием для Российской Федерации не только в управлении экологическими и климатическими рисками на собственной территории, но и в отстаивании национальных социально-экономических интересов на международном уровне.

Если говорить, например, о планировании упреждающей адаптации (см., например, Хлебникова и др., 2020) к изменениям климата как в отраслевом, так и в региональном разрезах, Россия находится лишь в самом начале долгого и многотрудного пути, на котором стране потребуется большая информационно-аналитическая и научная поддержка, обеспечиваемая, в числе прочего, отвечаю-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

щими мировому уровню высокотехнологичными инструментами мониторинга, моделирования и анализа состояния земной системы – глобально, на территории России, а также в других регионах мира, представляющих для России интерес в экономическом, политическом или ином аспекте климатической проблематики.

Важнейшие государственные задачи, поставленные перед российской климатической наукой в 2021-2022 гг.

Вышеописанное положение (см. также Катцов, 2022) потребовало усиления государственного управления наиболее актуальными разработками и исследованиями в области климата, экологии и в смежных областях – в форме скоординированной на национальном уровне научно-технической программы. В связи с этим начиная с 2021 года Российская Федерация предприняла ряд решительных шагов в направлении улучшения сложившейся ситуации.

Во исполнение Указа Президента Российской Федерации «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» (от 8 февраля 2021 г. № 76) Правительство Российской Федерации утвердило Федеральную научно-техническую программу в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы (постановление Правительства Российской Федерации от 8 февраля 2022 г. № 133) (далее – ФНТП).

Целью ФНТП является повышение эффективности научно-технической деятельности в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений.

Задачи программы включают создание наукоемких технологических решений, направленных на:

- обеспечение экологической безопасности, улучшение состояния окружающей среды;
- изучение климата, механизмов адаптации к климатическим изменениям и их последствиям;
- обеспечение устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов (ПГ) путем проведения исследований источников и поглотителей ПГ и принятия мер по уменьшению негативного воздействия таких газов на окружающую среду.

Одним из ключевых направлений ФНТП является развитие систем мониторинга и прогнозирования окружающей среды. Целевая функция науки в рамках ФНТП состоит в обеспечении получения достоверных данных об окружающей среде и климатических изменениях, включая как эмиссию и сток ПГ, так и индикаторы климатических и экологических параметров – на основе мониторинга, а также физико-математического моделирования и прогнозирования, отвечающих мировому уровню. Без прорывного развития отечественной науки в соответствующих направлениях невозможна разработка эффективных отраслевых техноло-

гий и инфраструктурных решений, направленных на адаптацию к климатическим изменениям и их смягчение.

В связи с этим реализация ФНТП должна способствовать ответу нашей страны на следующие вызовы:

- отставание от мирового уровня в части наукоемких технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды и климата, основанных на современных наблюдательных системах и моделировании;
- недостаточность и (или) неадекватность мер адаптации к нарастающим изменениям климата при, в целом, высоком адаптационном потенциале Российской Федерации;
- недостаточное использование значительного потенциала внедрения низкоуглеродных, а также экологически чистых технологий в экономике Российской Федерации;
- недостаточная эффективность мер по защите российских товаропроизводителей от возможных недобросовестных действий зарубежных партнеров под предлогом несоответствия требованиям климатической безопасности;
- недостаточное внимание к стратегиям адаптации разных социальных групп к изменениям природной среды и климата в регионах Российской Федерации.

Цель ФНТП должна быть достигнута выполнением ряда мероприятий. Одно из таких мероприятий предусматривает создание и развитие инфраструктуры для проведения исследований и разработок, в том числе создание и развитие научных и научно-образовательных центров, другое – проведение научных исследований и разработок преимущественно на базе таких центров.

В дополнение к ФНТП Президентом Российской Федерации было дано поручение (от 2 мая 2021 г. № Пр-753) на разработку Важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание и развитие «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ» (далее – ВИПГЗ). Концепция ВИПГЗ была представлена и одобрена на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию 8 февраля 2022 года. Разработанный вслед за этим ВИПГЗ вместе с планом реализации его первого этапа (2022-2024 гг.) был утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации (от 29 октября 2022 г. № 3240-р).

ВИПГЗ ориентирован в первую очередь (но не исключительно) на получение достоверных данных о климатически активных веществах (ПГ, аэрозолях), прежде всего на территории России, предусматривая также и правовую регламентацию использования этих данных для регулирования антропогенных выбросов и проведения соответствующей трансформации отраслей экономики.

ВИПГЗ синергичен ФНТП, а их участники объединены в шесть консорциумов в форме научных и научно-образовательных центров, в которых из числа научных и образовательных организаций выделяется головная организация такого центра:

1. Центр моделирования и прогнозирования глобального климата «Земная система: моделирование и прогноз». Головная организация – Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

2. Центр климатического и экологического мониторинга океана и морей России «Океан: мониторинг и адаптация». Головная организация – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

3. Центр климатического и экологического мониторинга суши и адаптации к абиотическим факторам климатических изменений «Суша: мониторинг и адаптация». Головная организация – Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова.

4. Центр мониторинга климатически активных веществ «Углерод в экосистемах: мониторинг». Головная организация – Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН.

5. Центр экономико-социальных проблем адаптации и смягчения антропогенного воздействия на климат «Экономика климата». Головная организация – Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН.

6. Центр обеспечения Национального кадастра антропогенных выбросов «Антропогенные выбросы: кадастр». Головная организация – Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля.

Для каждого из консорциумов определена цель (миссия), достижение которой обеспечивается решением ряда задач:

Миссия консорциума 1 «Земная система: моделирование и прогноз» состоит в разработке глобальной модели земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, обеспечить повышение точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов. Задачи консорциума включают: (1) количественную оценку чувствительности Земной системы к внешним воздействиям; а также (2) количественную оценку современного состояния и будущих изменений естественных источников и стоков атмосферных ПГ.

Миссия консорциума 2 «Океан: мониторинг и адаптация» состоит в разработке системы климатического и экологического мониторинга ключевых районов Мирового океана и морей России и региональных модельных систем, обеспечить формирование ретроспективных анализов акваторий субполярной Северной Атлантики, северо-западной части Тихого океана и морей России. Задачи консорциума включают: (1) разработку системы климатического и экологического мониторинга ключевых районов Мирового океана и морей России; (2) разработку систем регионального моделирования; а также (3) обеспечение формирования реанализов для акваторий субполярной Северной Атлантики, северо-западной части Тихого океана и морей России.

Миссия консорциума 3 «Суша: мониторинг и адаптация» состоит в расширении системы климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории Российской Федерации в целях обеспечения адаптационных решений в отраслевом и региональном разрезах, включая борьбу с опустыниванием. Задачи консорциума включают: (1) создание государственной системы (фоновой) мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на территории России; (2) разработку адаптивной системы гидрологического мониторинга

(АСГМ); (3) информационно-аналитическое обеспечение разработки второй очереди Генеральной схемы действий по борьбе с опустыниванием (ДБО); (4) создание системы интегрированного городского климатического обслуживания (СИГОВО); а также (5) создание высоко разрешающей многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПК).

Миссия консорциума 4 «Углерод в экосистемах: мониторинг» состоит в разработке системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков ПГ на территории Российской Федерации, а также обеспечении создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах. Задача консорциума включают: (1) уточнение существующих и получение новых данных, необходимых для оценки поглощения ПГ управляемыми и неуправляемыми наземными экосистемами; (2) оценку потенциала поглощения ПГ управляемыми лесами с учетом развития лесного хозяйства; а также (3) оценку мер смягчения последствий изменения климата в сельском хозяйстве с учетом развития отрасли.

Миссия консорциума 5 «Экономика климата» состоит в оценке социально-экономических последствий реализации климатических повесток, включая адаптацию к изменению климата и низкоуглеродное развитие – на международном уровне и в Российской Федерации. Задача консорциума включают: (1) разработку методов и моделей для создания системы оценки осуществимости и эффективности мер, направленных на смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат, а также на создание и реализацию соответствующих научно обоснованных технологических решений; а также (2) разработку научно обоснованных технологических решений, содействующих созданию системы оценки рисков для окружающей среды и климата на территории России и прилегающих акваторий с целью обоснования и принятия необходимых мер адаптации к изменению климата с учетом региональной и отраслевой специфики, а также подтверждения эффективности их применения.

Миссия консорциума 6 «Антропогенные выбросы: кадастр» состоит в осуществлении технического перевооружения, цифровизации и актуализации Национального кадастра ПГ, обеспечении совершенствования сбора исходных данных. Задачи консорциума включают: (1) внедрение части новых и уточненных существующих коэффициентов и параметров оценки выбросов ПГ для уточнения данных Национального кадастра, в том числе с учетом данных мониторинга пулов углерода и потоков ПГ; (2) проведение цифровизации Национального кадастра; а также (3) создание системы расчетного мониторинга и оценки выбросов отдельных климатически активных веществ, в частности, мелкодисперсных твердых частиц, содержащих углерод («черный углерод»), на территории Российской Федерации.

Таким образом поле деятельности консорциумов охватывает все компоненты земной системы (главным образом, на территории России и прилегающих акваториях) и ее взаимодействия с человеком: смягчение воздействия антропогенного фактора на окружающую среду и климат, а также адаптацию к воздействиям окружающей среды, включая изменения климата, на человека и его деятельность.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Предельно обобщая задачи, стоящие перед консорциумами ФНТП-ВИПГЗ, можно свести их к получению ответов на следующие вопросы:

1. Что происходит (с земной системой)? (все консорциумы, кроме 5).
2. Почему это происходит? (консорциум 1, отчасти – 2 и 3).
3. Что нас ожидает? (консорциумы 1 и 3).
4. Что нужно (и можно) с этим делать? (консорциум 5).

Мониторинг, в отличие от пассивного наблюдения, имеет отчетливую целевую установку: активное, сфокусированное наблюдение с целью контроля изменения состояния, отклонения от нормы. Климатический мониторинг сфокусирован на изменении климата. Это порождает особые требования к наблюдениям за климатом, в частности, необходимость обеспечения определенного уровня качества, полноты и репрезентативности данных.

Мониторинг обеспечивает формирование ключевой информационной основы для выработки, реализации и оценки результативности климатической политики Российской Федерации, в частности, в отношении целей и путей, пределов и механизмов адаптации к изменениям климата, являющейся главной задачей климатического обслуживания, под которым следует понимать создание информационной климатической продукции и предоставление ее потребителю с использованием тех или иных средств коммуникации и презентации. (см., например, Катцов, 2015). Кроме того, мониторинг служит источником данных для оценки качества физико-математических моделей климата, которые необходимы для сценарного прогнозирования изменений климата.

В свою очередь, сценарные прогнозы изменений климата «подсказывают» направления развития мониторинга, в частности, находящейся в ведении Росгидромета Государственной наблюдательной сети (ГНС), ее собственной адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата. Сценарные климатические прогнозы – как глобальные, так и для регионов России – способствуют принятию решений по широкому спектру экономических, социальных и других вызовов, связанных с изменением климата; позволяют, в частности, определить важнейшие потребности в упреждающей адаптации к возможным в будущем изменениям климата.

Эффективность и независимость климатической политики страны, в том числе на «внешнем контуре», напрямую зависят от наличия собственных прогнозных технологий мирового уровня, а также – собственных высококвалифицированных кадровых ресурсов и соответствующей инфраструктуры, обеспечивающих полномасштабное применение и развитие этих технологий. Выведение на мировой уровень отечественных систем сценарного прогнозирования – глобального и регионального – и обеспечение их развития и эксплуатации необходимыми вычислительными ресурсами – одно из ключевых условий эффективности и независимости национальной климатической политики, в том числе на «внешнем контуре».

Предполагается, что каждый из консорциумов на определенной стадии своего развития (некоторые – изначально) включается во взаимодействие с другими,

обеспечивая тем самым построение к 2030 г. целостной системы информационно-аналитического и научного обеспечения внутренней и внешней политики Российской Федерации в области климата.

Задача расширения системы климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории Российской Федерации («Суша: мониторинг и адаптация»)

В значительной мере задачи, которые стоят перед консорциумом «Суша: мониторинг и адаптация», ориентированы на ГНС и отвечают приоритетам климатического обслуживания в Российской Федерации в условиях меняющегося климата, сформулированным в Третьем оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Росгидромет, 2022).

Какими же вызовами, связанными с изменением климата, обусловлены задачи консорциума «Суша: мониторинг и адаптация»? Прежде всего, это уникальное разнообразие климатических условий и климатических воздействий на огромной территории России, что является одновременно и вызовом (объективные проблемы мониторинга, особенности моделирования и прогнозирования для регионов страны), и адаптационным преимуществом перед другими странами.

Во-вторых, это связанная с указанным разнообразием потребность в развитии целого ряда компонентов мониторинга, включая математические модели и информационные технологии поддержки принятия решений, обеспечивающих адаптационные мероприятия (управление экологическими и климатическими рисками) в условиях меняющегося климата, в том числе в отношении национальных водных и сельскохозяйственных ресурсов, а также городских агломераций.

Наконец, это потребность в выведении на мировой уровень национальной многоцелевой системы сценарного прогнозирования регионального климата с высоким разрешением для информационно-аналитического обеспечения управления рисками на территории России и прилегающих территориях и акваториях («суверенность» (независимость) и прикладное значение количественных сценарных прогнозов).

Помимо ГГО, в консорциум «Суша: мониторинг и адаптация» на первом этапе реализации ФНТП-ВИПГЗ вошли Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ) Росгидромета; Государственный гидрологический институт (ГГИ) Росгидромета; Институт водных проблем (ИВП) РАН; Карельский научный центр (КарНЦ) РАН и Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения (ФНЦА) РАН.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Задача 1 «МЕРЗЛОТА»: Создание государственной системы (фонового) мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на территории России.

На обширных пространствах криолитозоны Российской Федерации, которая, как известно, распространяется на 2/3 территории страны, многолетняя мерзлота реагирует на межгодовые колебания и многолетние изменения климата, увеличивая риски техногенных катастроф, а также другие риски (например, санитарно-эпидемиологические – связанные с оттаиванием находящихся в мерзлоте могильников). Мерзлота определяет водный и температурный режим почвы, поэтому мониторинг многолетней мерзлоты имеет ключевое значение для повышения точности гидрологических и агрометеорологических прогнозов. Рост содержания в атмосфере ПГ также диктует необходимость организации фонового мониторинга мерзлоты, так как при ее деградации (оттаивании) в современный круговорот климатически активных веществ могут включаться значительные запасы законсервированной органики, разложение которой должно приводить к выделению в атмосферу углекислого газа и метана.

К началу реализации ФНТП-ВИПГЗ на территории Российской Федерации отсутствовала государственная система инструментального фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты. Текущие наблюдения в рамках отдельных отечественных и международных программ и проектов обладают рядом критических недостатков: значительные территории не охвачены мониторингом; распределение пунктов наблюдений не обеспечивает репрезентативность мониторинга в масштабе страны; отсутствуют унификация методов, объектов, измеряемых характеристик, приборной базы мониторинга; часто отсутствуют ряды сопряженных метеорологических данных; отсутствуют единый национальный оператор и центр сбора, анализа и распространения данных мониторинга.

ААНИИ разработана концепция создания государственной системы мониторинга (фонового) состояния многолетней мерзлоты (ГСМСММ) на основе ГНС. Базовым элементом ГСМСММ должна стать распределенная по территории криолитозоны Российской Федерации сеть из 140 пунктов мониторинга многолетней мерзлоты, сопряженных с наблюдательными станциями и обсерваториями Росгидромета. На всех пунктах предусмотрено выполнение непрерывных сплошных автоматических измерений температуры многолетней мерзлоты в скважинах глубиной не менее 25 м. В трех десятках пунктов запланировано проведение наблюдений за динамикой сезонно-талого слоя. Выбор станций Росгидромета для организации вблизи них пунктов мониторинга мерзлоты производится с использованием научно-методически обоснованных критериев, что обеспечивает репрезентативность наблюдательной сети.

Создание пунктов мониторинга мерзлоты должно проводиться в соответствии с отечественными нормативными документами и основными требованиями международных программ TSP (*Thermal State of Permafrost* – термическое состояние мерзлоты) и CALM (*Circumpolar Active-Layer Monitoring* – циркумполярный мониторинг деятельного слоя). Данные с пунктов мониторинга должны

передаваться для обработки, архивации и анализа в Центр мониторинга состояния многолетней мерзлоты ААНИИ, где эти данные и информационная продукция, подготовленная на их основе, станут доступными для органов государственной власти, заинтересованных учреждений, международных центров – в рамках участия России в международных программах.

Дальнейшее развитие ГСМСММ предусматривает как увеличение числа пунктов мониторинга для сгущения наблюдательной сети, так и расширение спектра наблюдаемых характеристик состояния многолетней мерзлоты. Впоследствии ожидается полномасштабное функционирование ГСМСММ во взаимодействии с ведомственными системами геотехнического мониторинга, а также получение на основе ГСМСММ количественных оценок деградации мерзлоты на территории Российской Федерации, включая ее вклад в глобальный углеродный бюджет.

Задача 2 «ВОДА»: Разработка адаптивной системы гидрологического мониторинга (АСГМ) и национальной гидрологической моделирующей системы (НГМС).

Климатические изменения приводят к обострению угроз водной безопасности, прежде всего, водного дефицита и опасности наводнений, на значительной части территории России. Уже сейчас в средние по водности и, тем более, маловодные годы водный дефицит наблюдается в районах осуществления интенсивной хозяйственной деятельности: в бассейнах Дона, Иртыша, рек Северного Кавказа, Урала, западного побережья Каспия. Вследствие изменения регионального климата растет экономический ущерб от наводнений и увеличивается их частота на Дальнем Востоке, Северном Кавказе, в Алтайском крае, в Байкальском регионе. Согласно сценарным прогнозам, обострение угроз водной безопасности России продолжится.

Осуществление масштабных проектов по управлению водными ресурсами, защите населения и объектов экономики от наводнений в условиях климатических изменений, адаптации водного хозяйства страны и ее отдельных регионов к этим изменениям требует огромных капиталовложений и планируется на десятилетия вперед. Экономически эффективное и экологически безопасное водопользование в условиях современных вызовов обеспечивается средствами научной и информационно-аналитической поддержки принятия решений, включающими технологии гидрологического мониторинга, новые методы и модели анализа и прогноза изменений водного режима рек России. Деятельность коллективов ГГИ и ИВП РАН в рамках консорциума «Суша: мониторинг и адаптация» направлена на решение этих актуальных задач.

В близкой перспективе, наряду с созданием первой очереди Адаптивной системы гидрологического мониторинга (АСГМ) для речных бассейнов южных регионов ЕТР, предусмотрена разработка пилотной версии Национальной гидрологической моделирующей системы (НГМС) и подготовка баз сеточных данных (реанализа) гидрологических характеристик (водного режима рек, снежного покрова, влажности и глубины промерзания почвы и др.) на основе гибридизации

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

данных наблюдений с данными расчетов НГМС для бассейнов рек с ожидаемым повышением климатообусловленных гидрологических рисков. Фактически речь идет о создании на основе АСГМ, оснащенной НГМС, инструмента «раннего предупреждения» (об опасных гидрологических явлениях), а также адаптации к происходящим и ожидаемым изменениям климата.

Впоследствии планируется расширение АСГМ на бассейны рек в других регионах России, а также дальнейшее развитие НГМС – в частности, дополнение ее моделями (1) эмиссии CO_2 с поверхности крупных рек в атмосферу; (2) переноса углерода в океан крупными реками; (3) потоков CO_2 и CH_4 на поверхности крупных озер и водохранилищ в атмосферу.

Задача 3 «ОПУСТЫНИВАНИЕ»: Создание системы мониторинга состояния опустыненных земель, моделирования и прогнозирования развития процессов опустынивания, восстановления пострадавших земель в обеспечение действий по борьбе с опустыниванием (ДБО) (ДБО).

Изменения состояния земель засушливых и сухих регионов Российской Федерации, помимо прочего, связаны с естественными климатическими флуктуациями и антропогенным воздействием на климат. По сравнению с 1990 г., площадь сельхозугодий Российской Федерации, подверженных эрозии и дефляции, увеличилась на 22 млн га и на данный момент составляет 126 млн га. Отсутствие комплексного подхода к сохранению и восстановлению плодородия почв и продуктивности угодий, включающего меры предотвращения последствий засух и пыльных (песчаных) бурь, неконтролируемого антропогенного воздействия неизбежно приведет к дальнейшему ухудшению ситуации. Поэтому необходимость изучения процессов, приводящих к деградации и опустыниванию, их динамики, прогноза и разработки технологий восстановления нарушенных земель, является стратегической задачей науки и производства в обеспечение продовольственной и экологической безопасности страны. Применение ГИС-технологий позволяет ускорить разработку соответствующих технологий по уменьшению последствий негативного воздействия природных и антропогенных факторов на сельскохозяйственные угодья и повышение их продуктивности.

В близкой перспективе в рамках соответствующего направления ФНТП-ВИП-ГЗ, за реализацию которого отвечает ФНЦА РАН, ожидается: (1) введение в эксплуатацию геоинформационной системы «Опустынивание и его мониторинг», которая будет содержать фактические данные об опустыненных землях в регионах, динамику и прогноз их площади; (2) оценка результатов водных мелиораций, лесо- и фитомелиоративных работ, проведенных ранее, их площади, мелиоративной и экологической эффективности; (3) анализ организационно-хозяйственных, законодательных, нормативных документов и институциональных решений, направленных на оптимизацию сельскохозяйственного производства при достижении нейтральности деградации; (4) формирование перечня рекомендуемых комплексных взаимосвязанных технологических решений и технологий,

используемых для восстановления деградированных земель в обозначенных регионах, с учетом степени деградации; (5) разработка программ действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) для 14 субъектов российской Федерации: республик Бурятия, Дагестан, Калмыкия, Татарстан, Тыва, Хакасия, Чечня, Алтайского края, юга Красноярского, Ставропольского краев, Астраханской, Волгоградской, Ростовской, Саратовской областей.

В более отдаленной перспективе работы в рамках этого направления призваны обеспечить разработку Второй очереди Генеральной схемы действий по борьбе с опустыниванием, которая охватит 28 субъектов федерации.

Задача 4 «ГОРОДА»: Создание системы интегрированного городского климатического обслуживания (СИГОКО).

По имеющимся оценкам (Baklanov et al., 2020), 90% природных бедствий для урбанизированных территорий – гидрометеорологического происхождения (вероятно, они усугубляются с изменением климата): экстремальные жара и холод; экстремальный ветер; низкое качество воздуха и эпизоды пикового загрязнения; лесные пожары, песчаные и пылевые бури; городские наводнения. ВМО признает, что стремительная урбанизация, особенно в контексте климатических изменений, требует развития новых видов обслуживания, которые наилучшим образом повысят устойчивость городов к опасности, связанной с влиянием окружающей среды, погоды, климата, экстремальных погодно-климатических явлений и воздействий.

Городские особенности, в т.ч. морфология зданий и выбросы тепла, влияют на городской температурно-влажностный режим (например, формирование так называемых городских островов тепла), циркуляцию воздуха и изменяют образование и выпадение атмосферных осадков, другие атмосферные явления. Городская инфраструктура, являющаяся совокупностью дорожных, транспортных, финансовых, инженерных, социальных коммуникаций, является особо уязвимой при экстремальных проявлениях окружающей среды.

Интегрированное городское обслуживание является приоритетом и кросс-тематическим элементом стратегии ВМО и включает следующие компоненты: системы раннего предупреждения о разных бедствиях; интегрированные городские системы информации о ПГ; климатические услуги; прогнозирование воздействия и предупреждение о риске (см. например, Baklanov et al., 2018).

Задачей создаваемой ГГО национальной системы интегрированного городского климатического обслуживания (СИГОКО) как инструмента адаптации является мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды с целью управления экологическими и климатическими рисками, а также адаптации городской инфраструктуры, субъектов экономики и населения городов к изменению климата. СИГОКО основывается на высокоразрешающем эколого-климатическом мониторинге в городских агломерациях, который позволит оперативно предоставлять фактическую и прогностическую информацию о состоянии и загрязнении окружающей среды, об опасных и неблагоприятных погодных яв-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ниях (в том числе связанных с атмосферными осадками), по районам города и его близлежащих пригородов.

В близкой перспективе ожидается создание первой очереди СИГОКО в части мониторинга химического состава атмосферы (в т.ч. загрязнения атмосферного воздуха – с использованием развиваемой в ГГО единой автоматизированной системой обработки информации о загрязнении атмосферы АСОИЗА+ (Крысанов и др., 2021)), а также в части высокоразрешающего мониторинга атмосферных осадков.

Данные наблюдений за атмосферными осадками высокого пространственно-го и временного разрешения востребованы и в смежных с метеорологическими наблюдениями областях, например: (1) наблюдения за загрязнением атмосферы: информацию о характере и виде выпавших атмосферных осадков, а также количество выпавших атмосферных осадков используют для определения химического состава и кислотности атмосферных осадков для дальнейшего применения в установлении общего уровня атмосферного загрязнения, выяснения его динамики, оценки переноса веществ в атмосфере, определения сезонной и суммарной нагрузки содержащихся в осадках химических соединений на подстилающую поверхность; (2) радиолокационные наблюдения: калибровка информации об осадках метеорологических радиолокаторов осуществляется по данным осадкомеров; (3) климатология: количество и суточный максимум атмосферных осадков используются в строительной климатологии при проектировании зданий и сооружений, систем отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и ливневой канализации, при планировке и застройке городов и др.; (4) гидродинамическое моделирование мезомасштабных процессов в атмосфере; (5) гидрологические наблюдения: количество и интенсивность выпадения атмосферных осадков необходимы для прогноза уровней воды, стока, разработки методов расчетов и моделирования дождевых паводков и др.

На города приходится около 70% антропогенных выбросов основных долгоживущих ПГ (Baklanov et al., 2020). Существующий подход по оценке выбросов с территории городов основывается на статистических данных об антропогенной деятельности, в результате которой выделяются в атмосферу или поглощаются ПГ. Такой подход сопряжен с большим количеством неопределенностей, которые практически невозможно учесть вследствие отсутствия достоверной статистической информации. Создание подсистемы СИГОКО «Климатически активные газы» (КАГ) ориентировано на разработку инструмента контроля эмиссии основных ПГ с территории города на основе данных натуральных (наземных) наблюдений (в рамках пилотного эксперимента в Санкт-Петербурге) с дальнейшим развертыванием в городах на территории России. На основе результатов пилотного эксперимента будет предложен подход по оценке эмиссии основных антропогенных долгоживущих ПГ (CO_2 и CH_4) с городских территорий, который позволит получать информацию о динамике совокупного выброса ПГ с территории города в режиме времени близкого к реальному, идентифицировать ранее неизвестные источники выбросов и разрабатывать меры по

снижению выбросов ПГ. Получение данных наблюдений и выполнение оценки будет реализовано на основе СИГОКО. Создаваемый инструмент независимого контроля городской эмиссии ПГ на основе данных натуральных наблюдений предоставит возможность, в том числе, проводить сравнение с данными спутниковых наблюдений, которые уже сейчас позволяют зарубежным странам получать оценку эмиссии ПГ с территорий Российской Федерации (включая города как супер-эмиттеры) и других стран.

В более отдаленной перспективе ожидается расширение СИГОКО за счет включения новых компонентов: мониторинга городских водных объектов; прогнозирования неблагоприятных (с точки зрения загрязнения атмосферы) метеословий; контроля динамики совокупного выброса основных ПГ с территории города; усовершенствованного прогнозирования изменения климата для городов (в том числе как «островов тепла») и др.

Задача 5 «ПРОГНОЗ»: Создание высокоразрешающей многоцелевой системы моделирования и прогнозирования регионального климата (МСМПРК)

Создание высокоразрешающей Многоцелевой Системы Моделирования и Прогнозирования Регионального Климата (МСМПРК) направлено на сценарное прогнозирование состояния климатической системы в представляющих интерес регионах России и мира, в том числе и в первую очередь – в Арктическом макрорегионе и Арктической зоне Российской Федерации.

В ближайшей перспективе в рамках реализации ФНТП-ВИПГЗ ожидается разработка «МСМПРК-Арктика», предназначенной для использования, прежде всего, в сценарных прогнозах климатических изменений в арктическом макрорегионе – в обеспечение реализации российских планов и стратегий освоения и развития Арктики (см., например, Катцов и др., 2020). «МСМПРК-Арктика» предполагает возможность проведения значительных по размеру ансамбля и продолжительности экспериментов в сочетании с высоким пространственным разрешением в Арктическом макрорегионе (25 км в атмосфере и 14 км в океане). Ключевые элементы системы образуют региональная климатическая модель атмосферы ГГО и модель Северного Ледовитого океана, разработанная в КарНЦ РАН и ИВМ РАН.

Остальными элементами МСМПРК для каждой из целевых расчетных областей является соответствующий набор «субмоделей» для дальнейшей пространственной детализации процессов и климатических воздействий. Примерами таких субмоделей являются: модель трансформации речного стока для территории Северной Евразии, модели многолетней мерзлоты, пограничного слоя атмосферы, экосистем суши и океана и др.

Дальнейшее повышение пространственного разрешения в атмосферном компоненте МСМПРК наряду с обеспечением возможности проведения массовых ансамблевых расчетов, а также применением машинного обучения, позволит решать задачи климатического обслуживания крупных городских агломераций в рамках развития СИГОКО.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Создание многофункциональной высокоразрешающей МСМПК призвано обеспечить выведение на мировой уровень отечественных региональных исследований и сценарного прогнозирования климата в представляющих для России интерес регионах, в том числе в Арктике, а также в городских агломерациях.

Заключение

Приступив к реализации ФНТП-ВИПГЗ, консорциум «Суша: мониторинг и адаптация» связывает свои надежды на успех с рядом «стартовых» условий. Прежде всего, это опора на ГНС, функционирующую в соответствии с рекомендациями ВМО, но нуждающуюся в дополнительных компонентах. Развитие ГНС в соответствии с принципами и подходами ВМО является необходимым условием международного признания данных мониторинга.

В ряде областей планируемых разработок участники консорциума являются носителями многолетнего международно-признанного опыта научных исследований и практической деятельности. В распоряжении участников наличествуют отдельные апробированные инструменты – «точки роста» ФНТП-ВИПГЗ (климатические модели, автоматизированные системы сбора информации и т.п.), которые представляют собой существенный задел для решения поставленных задач.

В то же время реализация ФНТП-ВИПГЗ во многом зависит от успеха в преодолении существующего технологического отставания России в части необходимых для достижения намеченных целей вычислительных ресурсов (численное моделирование климатической/земной системы) и оборудования (новые компоненты национальной системы климатического и экологического мониторинга), что, в частности, обуславливает критическое значение тщательного планирования проекта на начальном и последующих этапах.

Настоящая статья является сжатым изложением статьи (Катцов, 2022), подготовленной в рамках реализации ВИПГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». Автор признателен всем участникам консорциума «Суша: мониторинг и адаптация» – ГГО, ААНИИ и ГГИ Росгидромета, а также ИВП РАН, КарНЦ РАН, ФНЦА РАН – за предоставленные ими материалы, использованные при подготовке статьи; а также руководству и сотрудникам ГВЦ Росгидромета за постоянную помощь в использовании суперкомпьютера Росгидромета.

Литература

1. Катцов В. М. (2015). Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра / В сб. Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб: Д'Арт. С. 66–80.
2. Катцов В.М., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. (2020). Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адапта-

ционных программ в экономике Российской Федерации // *Метеорология и гидрология*. № 5. С. 46–58.

3. Катцов В.М. (2022) *Климатическая наука для принятия решений* // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, т. 607.

4. Крысанов И.В., Полищук А.И., Иванова Н.Н. (2021). Об автоматизации обработки данных мониторинга загрязнения атмосферы // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Т. 601. С. 7-18.

5. Росгидромет (2011) *Решение VI Всероссийского метеорологического съезда (14—16 октября 2009 г., г. Санкт-Петербург)* // *Труды VI Всероссийского метеорологического съезда, Росгидромет. – Санкт-Петербург, 2011. – С.133-148.*

6. Росгидромет (2022). *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Катцов В. М., ред. Росгидромет. – Санкт-Петербург: Научно-технологические исследования, 2022. – 676 с.*

7. Хлебникова, Е.И., Акентьева Е.М., Гаврилова С.Ю., Ефимов С.В., Ивахов В.М., Караченкова А.А., Катцов В.М., Киселев А.А., Ключева М.В., Павлова В.Н., Павлова Т.В., Пикалева А.А., Порфирьев Б.Н., Ревич Б.А., Рудакова Ю.Л., Стадник В.В., Стерин А.М., Чичерин С.С., Школьник И.М. (2020) *Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) / Катцов В.М. и Порфирьев Б.Н., ред. С-Пб, Климатический центр Росгидромета, 120 сс.*

8. Baklanov A., Grimmond C.S.B., Carlson D., Terblanche D., Tang X., Bouchet V., Lee B., Langendijk G., Kolli R.K., Hovsepian A. (2018) From urban meteorology, climate and environment research to Integrated City services // *Urban Clim.*, V. 23, P. 330-341, 10.1016/j.uclim.2017.05.004

9. Baklanov A., Cárdenas B., Lee T.C., Leroyer S., Masson V., Molina L.T., Müller T., Ren C., Vogel F.R., Voogt J.A. (2020) Integrated urban services: Experience from four cities on different continents // *Urban Clim.*, V. 32, 100610, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100610>

ИЗМЕНЕНИЯ НОРМ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

Н.Н. Коршунова*, Н.В. Швець, С.Г. Давлетшин

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой центр данных, Обнинск

**nnk@meteo.ru, schvets@meteo.ru, sdavletshin@meteo.ru*

Аннотация. Под климатической нормой понимается та или иная характеристика климата, статистически полученная из многолетнего ряда, чаще всего средняя многолетняя величина.

Рассчитанные разности норм по основным метеорологическим параметрам – температуре воздуха, атмосферным осадкам, упругости водяного пара, атмосферному давлению на уровне моря, облачности, снежного покрова за три 30-летних периода 1961-1990, 1981-2000 и 1991-2020 гг. - позволили выявить сезонные изменения в режиме основных климатических параметров в отдельных регионах России за последние десятилетия. В последнее тридцатилетие на территории России выявлено замедление потепления во все сезоны. Нормы 1991-2020 гг. по осадкам летом уменьшились на большей части страны, однако значительное увеличение осадков получено на юге Дальневосточного ФО. В режиме атмосферного давления на уровне моря наибольшие изменения выявлены зимой: на ЕТР отмечалось значительное уменьшение атмосферного давления, обусловленное увеличением циклоничности, а на АТР – рост атмосферного давления, обусловленный ослаблением Алеутской депрессии и смещением на Чукотку вторичного ядра Сибирского антициклона. На большей части страны нормы повторяемости облачности 0-2 балла нижнего яруса за последние десятилетия уменьшились, особенно заметное уменьшение наблюдается в Западной Сибири.

Разности климатических норм, полученные в данной работе, могут рассматриваться как один из показателей изменений климата, которые проявляются неодинаково в различных регионах такой огромной страны как Россия.

Ключевые слова: климатическая норма, температура воздуха, атмосферные осадки, атмосферное давление, региональные особенности.

Введение

Одним из наиболее очевидных, несмотря на его простоту, показателем климатических изменений является изменение климатических норм, вычисленных за последовательные периоды времени.

Под климатической нормой понимается та или иная характеристика климата, статистически полученная из многолетнего ряда, чаще всего средняя многолетняя величина. Согласно регламенту ВМО (ВМО №1203, 2017) период осреднения для получения норм должен составлять 30 лет, хотя допускаются объективные пропуски данных до 20%. По решению 16-й сессии Комиссии по климатологии ВМО рекомендовано для долгосрочной оценки изменчивости и изменения климата использовать период 1961-1990 гг. в качестве стабильного базового периода ВМО, и для этих целей нормы пересчитывать за неперекрывающиеся 30-летние периоды (WMO-№ 1137, 2014). Для целей мониторинга климата и оперативной оценки аномальности текущей погоды рекомендовано использовать климатологические стандартные нормы, которые должны обновляться каждые десять лет (ВМО № 1157, 2015). Во ВНИИГМИ-МЦД по заданию Росгидромета нормы основных климатических параметров (температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара, атмосферного давления на уровне моря) на территории России рассчитывались за три 30-летних периода с шагом в 10 лет: 1961-1990, 1971-2000 и 1981-2010 гг.

Исследование региональных особенностей изменения норм основных климатических параметров на территории России за три 30-летних периода с шагом в 10 лет: 1961-1990, 1971-2000 и 1981-2010 гг., проведенное по итогам этих расчетов (Коршунова Н.Н., Швець Н.В., 2014), показало, что изменения климата проявляются неодинаково в различных регионах такой огромной страны как Россия. Наибольшее потепление произошло зимой на Европейской территории страны (ЕТР), севере Восточной Сибири и на дальневосточном юге в период 1981-2010 гг., а на северо-востоке Азиатской территории (АТР) отмечено похолодание. Значительное уменьшение летних осадков наблюдалось в центральных районах Западной Сибири, Забайкалье и Хабаровском крае, что явилось одной из главных причин участвовавших в последние годы лесных пожаров. В режиме атмосферного давления на уровне моря наибольшие изменения выявлены зимой в период 1971-2000 гг.

Вопрос изменения климатических норм рассматривался и ранее. Например, в (Belokrylova T. et al., 1992) исследовалось изменение на территории России разницы между нормами по температуре воздуха, полученными за два последовательных 30-летия – 1931-1960 гг. и 1961-1990 гг. Результаты показали увеличение норм на большей части южной половины страны и уменьшение на арктическом побережье и островах.

1. Данные

В данном исследовании использованы нормы по основным метеорологическим параметрам – температуре воздуха, атмосферным осадкам, упругости водяного пара и атмосферному давлению на уровне моря. Нормы вычислены за три

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

30-летних периода: 1961-1990 (N1), 1981-2000 (N2) и 1991-2020 гг. (N3). Расчеты проведены в соответствии с требованиями ВМО (ВМО №1203, 2017). Для всех метеорологических параметров рассчитаны следующие разности норм:

$$\Delta N1=N3-N1;$$

$$\Delta N2=N3-N2$$

Результаты представлены в виде карт, подготовленных с помощью ГИС в регулярной стереографической проекции, в которой используется стандартный метод обратных взвешенных расстояний с коэффициентами обратно пропорциональными квадрату расстояния.

Для характеристик снежного покрова рассчитаны разности норм за два периода 1991-2020 гг. и 1971-2000 гг., которые использовались для мониторинга снежного покрова (Доклад об особенностях климата..., 2023).

Для девяти квазиоднородных районов, определенных на основе классификации Алисова и использованных ранее в (Коршунова Н.Н., Швець Н.В., 2014), рассчитаны средние значения (простое арифметическое среднее) разностей $\Delta N1$.

В изменении норм всех рассматриваемых метеорологических параметров выявлены региональные особенности, которые проявляются более или менее ярко в разные сезоны года.

2. Температура воздуха

Наибольшие изменения норм произошли в зимний период (рис. 1, а), что лишь подтверждает известный факт наибольшего потепления именно зимой (Бульгина О.Н. и др., 2000; Второй оценочный доклад..., 2014; Коршунова Н.Н. и др., 2018). Практически на всей ЕТР, за исключением горных районов Северного Кавказа, разности норм $\Delta N1$ (1991-2020 гг. и 1961-1990 гг.) составляют 1,5-3°C (рис.1).

На северо-западе ЕТР, в Калининградской области, отдельных районах Архангельской области и Республики Коми разности норм $\Delta N1$ в январе превышают 3°C. Объясняется это увеличением циклоничности над ЕТР в последние десятилетия XX века (Бардин М.Ю., 1995) и хорошо согласуется с полученными в данном исследовании уменьшением норм по атмосферному давлению и увеличением норм по осадкам и парциальному давлению водяного пара. На АТР зона наибольших значений разности $\Delta N1$ протянулась с северо-запада, от полуострова Таймыр на юго-восток, до южных районов Хабаровского края и Сахалина. В северо-западных, центральных и юго-восточных районах Якутии разности норм $\Delta N1$ превышают 3°C. На Чукотке и севере Камчатского края сформировался очаг отрицательных значений $\Delta N1$. По-видимому, пик потепления пришелся на период 1961-1990 гг., и нормы за все последующие тридцатилетние периоды на метеорологических станциях этого региона были меньше. Однако, несколько очень теплых зим уже в XXI веке привели к исчезновению этого очага (рис. 2, а), т.к. январские нормы 1991-2020 гг. превысили нормы 1981-2010 гг. Напротив,

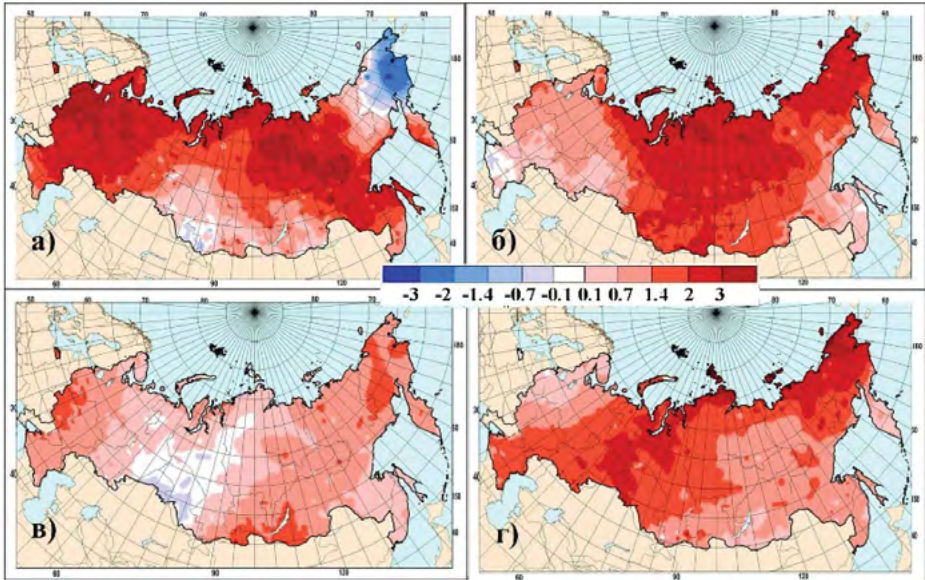


Рис. 1. Разность норм 1991-2020 гг. и 1961-1990 гг. по температуре воздуха на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

небольшой очаг отрицательных аномалий $\Delta N1$ в южных районах Западной Сибири значительно расширился. Отрицательные значения $\Delta N2$ в январе отмечаются на юге Урала, Красноярского края и в Тыве (рис. 2, а).

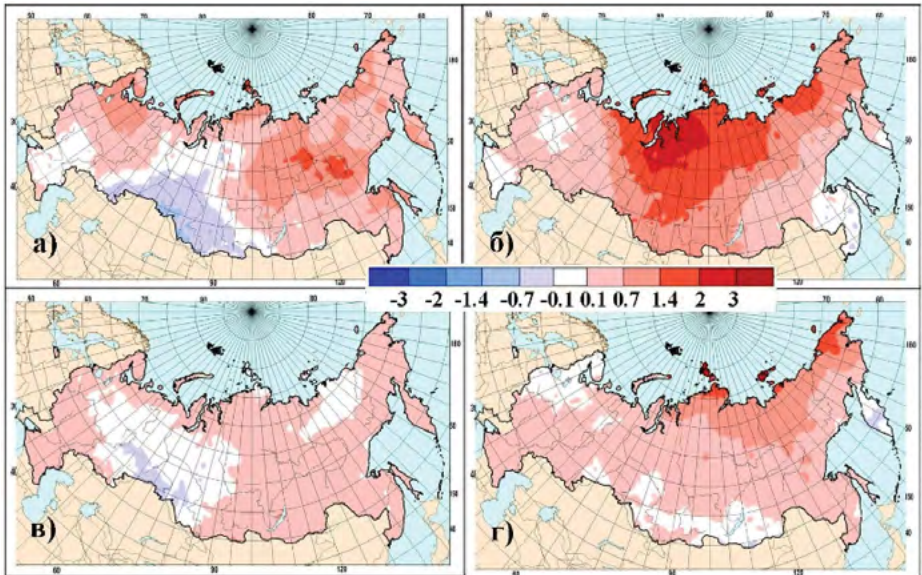


Рис. 2. Разность норм 1991-2020 гг. и 1981-1990 гг. по температуре воздуха на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Летом наибольшие значения $\Delta N1$ в 1,5-2°C отмечаются в западных областях Центрального ФО, Тыве, оз. Байкал и Магаданской области. Неизменными летние нормы температуры воздуха остались в центральных районах Западной Сибири, а на юге региона лето в последнее тридцатилетие стало прохладнее. В переходные сезоны – весной и осенью – значительные положительные разности $\Delta N1$ отмечаются на Азиатской территории России, особенно в северных районах. На Таймыре весной и на Чукотке осенью разности $\Delta N1$ превысили 3°C.

Замедление процесса потепления на территории России наблюдается во все сезоны года, что проявляется в уменьшении положительных значений $\Delta N2$ (рис. 2). Значительно увеличилось число «белых» областей, т.е. районов, где климатические нормы за периоды 1981-2010 гг. и 1991-2020 гг. остались практически неизменными. Наиболее значительные разности $\Delta N2$, превышающие 2°C, отмечаются весной только в районе Обской Губы и на западе Таймыра (рис. 2, б). Стоит отметить, что весна в последнее 30-летие стала холоднее на дальневосточном юге, где на отдельных метеорологических станциях отмечены отрицательные значения $\Delta N2$. Отрицательные значения $\Delta N2$ получены также осенью в центральных районах Камчатки.

3. Атмосферные осадки

Пространственное распределение осадков имеет пятнистый характер в силу того, что на выпадение осадков в значительной степени влияет рельеф местности. На рис. 3 показаны разности норм $\Delta N1$ в центральные месяцы сезонов. Зимой выделяются две обширные зоны противоположных знаков. Максимальные разности $\Delta N1$ получены в северо-западных районах ЕТР и на южном Урале, где разность норм составила более 10 мм, а на отдельных метеорологических станциях – более 15 мм (рис. 3, а). Атлантические циклоны приносили теплые, насыщенные влагой воздушные массы, которые проливались обильными осадками.

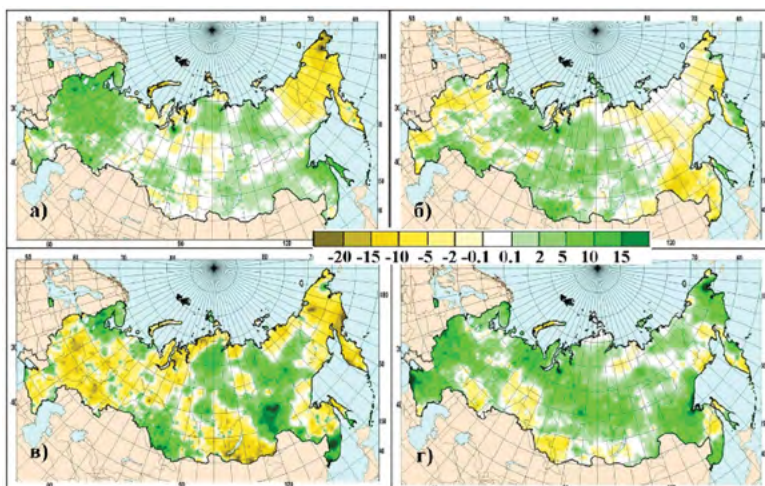


Рис. 3. Разность норм 1991-2020 гг. и 1961-2010 гг. по осадкам на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

На северо-востоке АТР получены отрицательные значения $\Delta N1$, причем этот очаг территориально совпадает с очагом отрицательных значений $\Delta N1$ по температуре воздуха и значительных положительных разностей норм по атмосферному давлению на уровне моря (см. ниже). На Чукотском п-ве нормы по осадкам за период 1991-2020 гг. стали меньше на 15-20 мм.

Наиболее ярко различия норм по осадкам за два базовых периода проявились летом (рис. 3, в), причем на территории страны преобладают области с отрицательными значениями $\Delta N1$, т.е. нормы в июле за новый базовый период 1991-2020 уменьшились. Очагов положительных значений немного, они невелики по площади, но очень интенсивны. В Карелии и на юге Западной Сибири $\Delta N1$ превысили 15 мм. Но максимальные значения $\Delta N1$ получены в южных районах Якутии, Амурской области и Приморье, где на отдельных метеорологических станциях разность норм превышает 20 мм. В этих районах в последние годы выявлена тенденция увеличения экстремальных осадков (Коршунова Н.Н. и др., 2018), что приводит к увеличению их доли в годовой сумме осадков (Коршунова Н.Н., Давлетшин С.Г., 2021) и оказывает существенное влияние на изменение норм.

Как видно на рис. 4, разности норм $\Delta N2$ уменьшились по абсолютной величине во все сезоны, хотя это более характерно для зимы и весны (рис. 4, а и б). Во многих районах нормы в январе и апреле за последнее тридцатилетие практически не изменилось по сравнению с предыдущим.

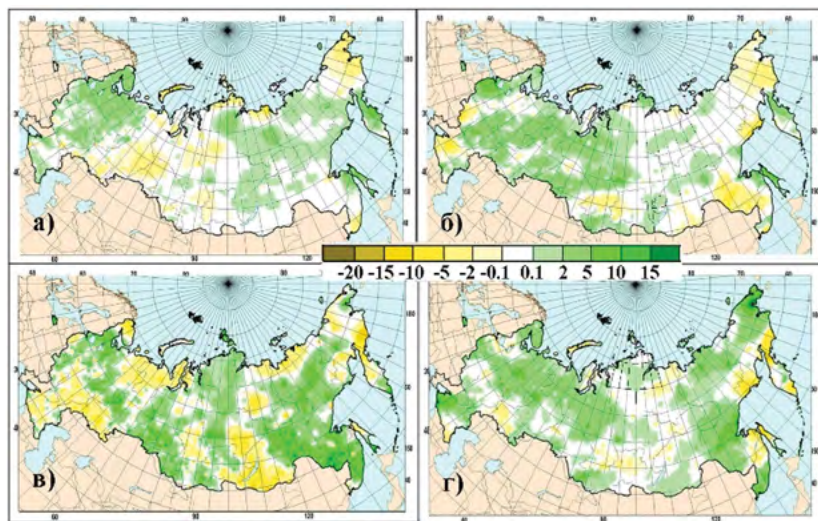


Рис. 4. Разность норм 1991-2020гг. и 1981-2010гг. по осадкам на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

Летом максимальные значения разности $\Delta N2$ сохраняются на дальневосточном юге, где рекордные осадки пришлось именно на последнее десятилетие и стали причиной катастрофических наводнений (2013 год – река Амур; 2017 год

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

– малые реки Приморья). Дождливее лето стало также на большей части Западной Сибири и Красноярского края, Среднем Урале, Карелии и Архангельской области, а засушливее – в Мурманской области, Республике Коми, Поволжье, на Южном Урале, в Забайкалье и севере Камчатского края.

Осенью (рис. 4, г) на территории страны преобладают положительные разности норм ΔN_2 . Максимальные значения (более 15 мм) отмечены на Черноморском побережье Кавказа, западном побережье Охотского моря, на Чукотке и в Приморье. Нормы за период 1991-2020 гг. значительно уменьшились в нижнем течении Амура, на севере Сахалина, в прибрежных районах Магаданской области и на севере Камчатского края.

4. Атмосферное давление

Анализ изменения норм по атмосферному давлению показал, что наибольшее изменение за период 1991-2020 гг. климатические нормы по давлению на уровне моря претерпели зимой (рис. 5, а). На Европейской территории произошло понижение атмосферного давления в результате увеличения циклоничности (Бардин М.Ю., 1995; Попова В.В., 2018). Наибольшее уменьшение (на 2-3 мбар) отмечается в северной половине от западных границ до Прикамья. На большей части Западной Сибири, в северо-западных и центральных районах Красноярского края получены положительные разности норм ΔN_1 , что связано с преобладающим вкладом циркуляционных факторов (Ипполитов И.И. и др., 2014).

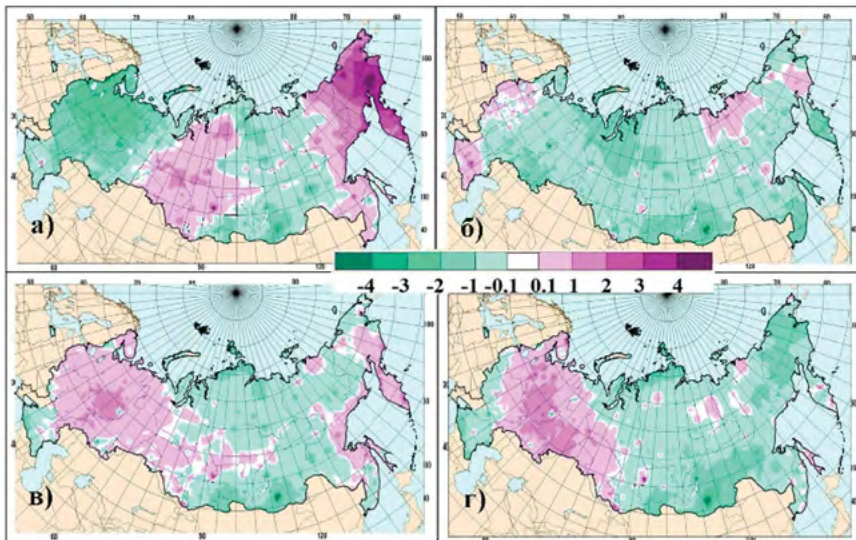


Рис. 5. Разность норм 1991-2020 гг. и 1961-1990 гг. по атмосферному давлению на уровне моря на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

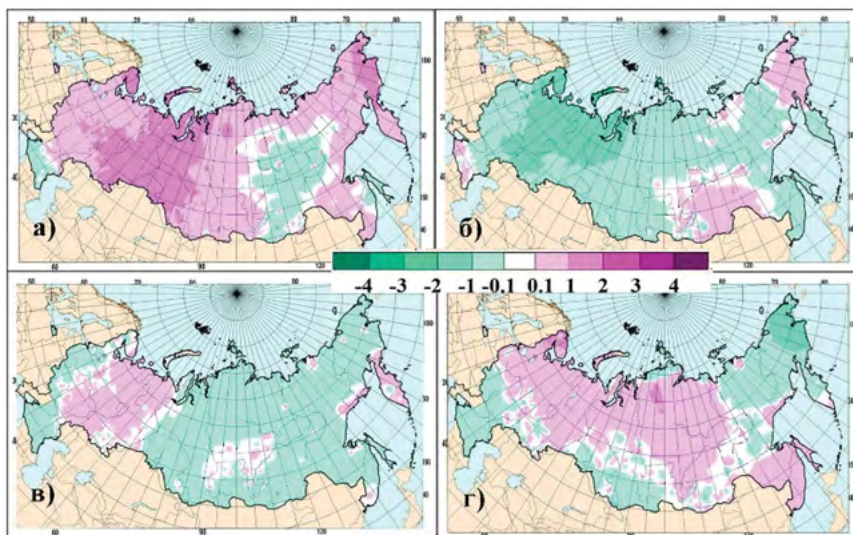


Рис. 6. Разность норм 1991-2020 гг. и 1981-2010 гг. по атмосферному давлению на уровне моря на территории России в центральные месяцы сезонов: а) – январь; б) – апрель; в) – июль; г) – октябрь

Однако наибольшее увеличение норм 1991-2020 гг. произошло в крайних северо-восточных районах АТР – на севере Камчатского края и в Чукотском автономном округе, где разности норм составили 3-4 мбар. На большей части Восточной Сибири отмечается уменьшение норм приземного давления, обусловленное ослаблением на рубеже веков Сибирского антициклона и смещением его центра на запад (Ипполитов И.И. и др., 2008).

Последнее десятилетие наибольшим образом повлияло на изменение норм именно зимой (рис. 6, а). Разности ΔN_2 положительны на большей части страны. Незначительное уменьшение норм 1991-2020 отмечено лишь в центральных районах Якутии и Забайкалья, а также на Сахалине и в устье Амура.

Весной нормы атмосферного давления на уровне моря за период 1991-2020 гг. уменьшились на большей части страны. Схожее распределение разностей норм за два базовых периода отмечается летом и осенью. На большей части ЕТР и в южных районах Западной Сибири увеличение норм 1991-2020 гг. составило 1-22 мбар. Наиболее значительное уменьшение норм произошло на арктическом побережье Таймыра и в Забайкалье. Области положительных разностей норм ΔN_2 значительно уменьшились летом (рис. 6, в) и увеличились осенью (рис. 6, г).

5. Парциальное давление водяного пара

Климатические нормы по парциальному давлению, или упругости, водяного пара в период 1991-2020 гг. незначительно увеличились на большей части страны во все сезоны. Наибольшие положительные значения ΔN_1 получены летом в Якутии и Саянах, где увеличение норм 1991-2020 гг. составило от 1 до 1,5 мбар.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Незначительное уменьшение норм 1991-2020 гг. отмечено зимой на Чукотке и севере Камчатского края, весной – в южной половине ЕТР, летом – на Южном Урале. Осенью разности норм $\Delta N1$ положительны на всей территории страны. Увеличение парциального давления пара на большей части страны обусловлено ростом температуры. Разности норм $\Delta N2$ практически не изменились зимой на всей территории страны, уменьшились летом на большей части ЕТР и Западной Сибири; весной – в южной половине ЕТР и на дальневосточном юге. Это может служить еще одним подтверждением того, что потепление замедляется, особенно зимой. Средние значения разностей норм 1991-2020 гг. и 1961-1990 гг. для девяти квазиоднородных климатических районов в центральные месяцы сезонов представлены в табл. 1. Данные этой таблицы также подтверждают наличие региональных особенностей в изменении норм основных метеорологических параметров. Следует отметить сокращение станций, по которым рассчитывались нормы за период 1991-2020 гг. Особенно это коснулось районов Чукотка и север Камчатки и Дальний Восток, где на этот период пришлось две волны закрытия труднодоступных метеорологических станций (1996-1997 гг. и 2013-2015 гг.), обусловленные как экономическими причинами, так и острой нехваткой квалифицированных кадров наблюдателей.

6. Снежный покров

Снежный покров является важнейшим параметром климатической системы, а для России он играет особую роль, поскольку почти половину года огромные территории в стране покрыты снегом. Снежный покров является чувствительным индикатором климатических изменений. Характеристики снежного покрова наиболее чувствительны к изменениям приземной температуры, хотя эта зависимость не является однозначной (Кислов А.В. и др., 2009).

Табл. 1. Разности норм 1991-2020 гг. и 1961-1990 гг. основных климатических параметров для квазиоднородных районов

Район	Число станций	месяцы			
		январь	апрель	июль	октябрь
Температура воздуха					
Север ЕТР и Западной Сибири	106	2.4	1.8	0.6	1.4
Сев. часть Восточной Сибири и Якутии	65	1.4	2.3	1.1	2.0
Чукотка и север Камчатки	16	-1.2	2.1	1.3	2.2
Центр ЕТР	410	2.7	0.9	0.9	1.3
Центр и юг Западной Сибири	207	0.9	1.6	0.0	1.8
Центр и юг Восточной Сибири	193	1.4	1.8	1.1	1.0
Дальний Восток	175	1.7	0.7	0.7	0.9

Продолжение таблицы 1

Район	Число станций	месяцы			
		январь	апрель	июль	октябрь
Алтай и Саяны	81	0.4	1.9	1.0	1.1
Юг ЕЧР	102	1.6	0.2	1.1	1.4
Атмосферные осадки					
Север ЕТР и Западной Сибири	111	3	1	2	5
Сев. часть Восточной Сибири и Якутии	64	-3	-0	-2	1
Чукотка и север Камчатки	16	-10	-4	-8	3
Центр ЕТР	418	5	-1	-6	5
Центр и юг Западной Сибири	212	0	2	2	-0
Центр и юг Восточной Сибири	195	1	-0	-3	2
Дальний Восток	177	1	-3	2	3
Алтай и Саяны	87	-0	3	-1	-2
Юг ЕЧР	103	1	-2	-2	10
Атмосферное давление на уровне моря					
Север ЕТР и Западной Сибири	104	-1.6	-0.8	0.2	0.2
Сев. часть Восточной Сибири и Якутии	64	0.6	-0.3	-0.4	-0.6
Чукотка и север Камчатки	15	2.6	-0.4	-0.1	-1.0
Центр ЕТР	375	-1.7	-0.4	0.5	0.5
Центр и юг Западной Сибири	174	0.4	-0.7	0.2	0.4
Центр и юг Восточной Сибири	167	-0.6	-0.9	-0.6	-1.0
Дальний Восток	163	0.7	-1.0	0.2	-0.3
Алтай и Саяны	65	-0.0	-1.0	-0.6	-0.5
Юг ЕЧР	87	-0.5	0.6	-0.5	-0.8
Парциальное давление водяного пара					
Север ЕТР и Западной Сибири	103	0.4	0.4	0.5	0.5
Сев. часть Восточной Сибири и Якутии	61	0.0	0.3	0.9	0.4
Чукотка и север Камчатки	15	-0.2	0.3	0.9	0.5
Центр ЕТР	372	0.5	-0.0	0.5	0.5
Центр и юг Западной Сибири	173	0.1	0.3	0.2	0.5
Центр и юг Восточной Сибири	170	0.1	0.4	0.9	0.3

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Окончание таблицы 1

Район	Число станций	месяцы			
		январь	апрель	июль	октябрь
Дальний Восток	158	0.2	0.2	0.6	0.4
Алтай и Саяны	77	0.1	0.5	0.9	0.3
Юг ЕЧР	92	0.5	-0.0	0.5	0.9

На рис. 7 приведены разности норм за периоды 1991-2020 гг. и 1971-2000 гг. по средней максимальной высоте и абсолютному максимуму высоты снежного покрова на территории России. Как видно из рисунка, преобладают положительные значения разности по максимальной высоте снежного покрова, но для большинства районов они не превышают 5-10 см (рис. 7, а). Наиболее значительное увеличение норм 1991-2020 (более 20 см) произошло в районе Обской Губы, на севере Сахалина и западном побережье залива Шелехова, в основном за счет увеличения осенних и зимних осадков. Это связано с тем, что повышение температуры автоматически вызывает рост насыщающей величины парциального давления водяного пара, что приводит к увеличению запасов влаги в воздухе и осадков в зимний период. Наиболее значительное уменьшение норм 1991-2020 (на 10-20 см) отмечается в северных и южных районах Камчатского края.

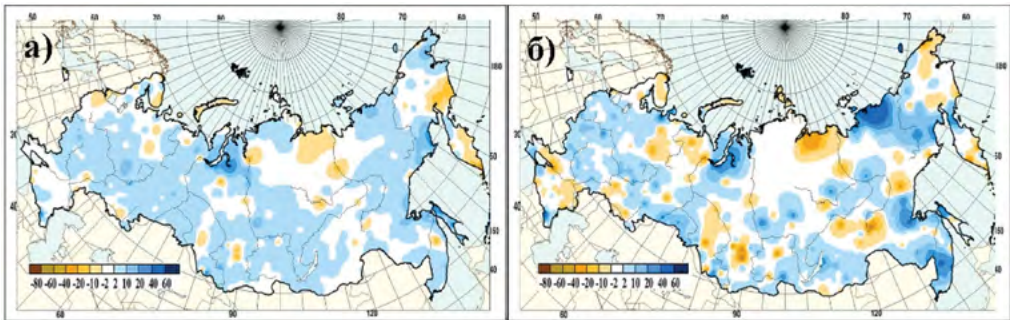


Рис. 7. Разность норм 1991-2020 гг. и 1971-2010 гг. по средней максимальной высоте (а) и абсолютному максимуму (б) высоты снежного покрова на территории России

Более заметные изменения произошли в абсолютных максимумах высоты снежного покрова. На 20-40 см увеличились абсолютные максимумы в районе Обской Губы, северо-восточных районах Якутии и на дальневосточном юге. Прежде всего, это связано с циркуляционными факторами, а именно с ослаблением Сибирского антициклона, особенно в осенний период. Кроме того, свидетельствует об увеличении экстремальных осадков, которые приводят к значительному приросту снежного покрова.

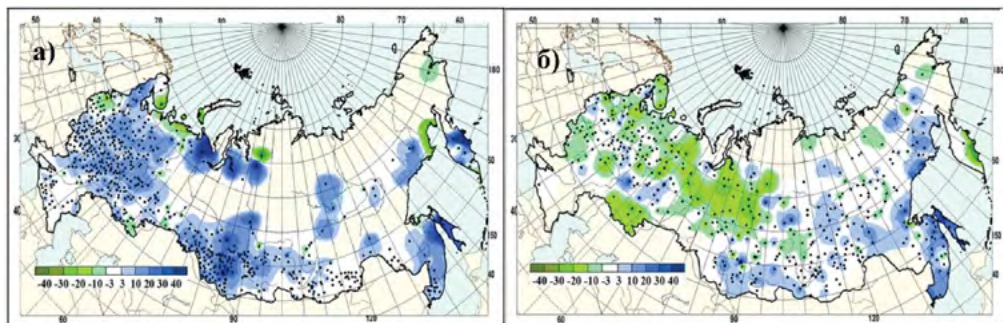


Рис. 8. Разности норм запаса воды в снеге за периоды 1991-2020 и 1971-2000 гг. по данным маршрутных снегосъемок а) в поле; б) в лесу

Запас воды в снеге является одной из важнейших характеристик снежного покрова, которая используется при прогнозировании весенних половодий, в качестве одного из входных параметров в численных моделях атмосферы. Пространственное распределение разностей норм за два периода 1991-2020 гг. и 1971-2000 гг. запаса воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок (рис. 8) согласуется с выявленными ранее тенденциями (Коршунова и др, 2021), но позволяет более детально определить некоторые региональные особенности, в частности наметившееся увеличение запаса воды в снеге на полевом маршруте в юго-западных районах ЕТР.

7. Облачность

В (Н.Н. Коршунова, Т.В. Дементьева, 2023) проанализировано изменение норм повторяемости ясного и пасмурного состояния неба, рассчитанных за два 30-летних периода 1991 - 2020 гг. и 1981 - 2010 гг. Значения, отраженные на рисунке 9, - это разность средней годовой повторяемости между двумя периодами. Пасмурным состоянием неба называются те случаи, когда облачность покрывала 80 - 100% небосвода, или 8 - 10 баллов. Ясным состоянием неба считаются сроки, облачность во время которых была от 0 до 2 баллов (по 10-бальной шкале), согласно оценке наблюдателя (Наставления...,1985).

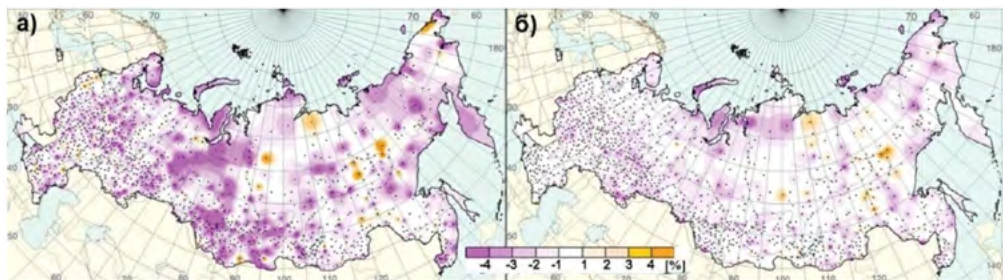


Рис. 9. Изменение норм повторяемости ясного (0-2 балла) состояния неба по облачности нижнего яруса (а) и общей облачности (б)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

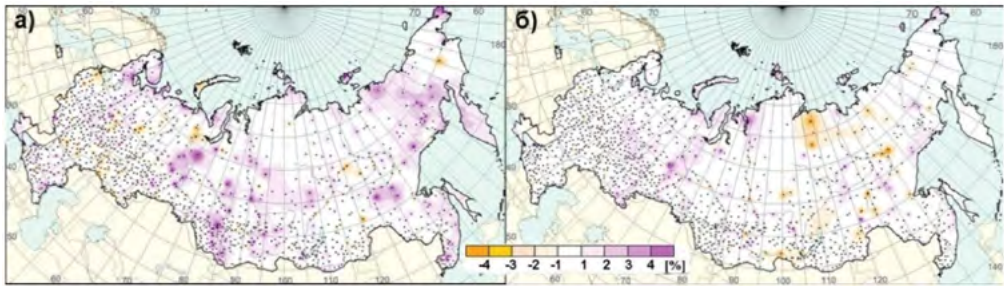


Рис. 10. Изменение норм повторяемости пасмурного (8-10 баллов) состояния неба по облачности нижнего яруса (а) и общей облачности (б)

Изменение норм повторяемости ясного состояния неба по общей облачности (рис. 9, б) показывает, что на большей части страны повторяемость изменилось не более, чем на 1% (белый цвет). Пунктов, где средний процент случаев ясного неба (фиолетовый цвет) уменьшился больше, чем пунктов с увеличением того же значения (оранжевый цвет). Нормы повторяемости облачности 0-2 балла нижнего яруса изменились гораздо больше (рис. 9, а). На большей части страны нормы за последнее 30-летие уменьшились, особенно заметное уменьшение наблюдается в Западной Сибири (3-4%).

Нормы повторяемости пасмурного неба изменились незначительно на большей части РФ (рис. 10). Можно отметить увеличение на 3-4% повторяемости пасмурного неба по нижней облачности в отдельных районах Западной Сибири, на юго-востоке Якутии и в континентальных районах Магаданской области. По общей облачности повторяемость пасмурного неба на 3-4 % уменьшилась в северо-западных районах Якутии и на отдельных метеостанциях Иркутской области и Забайкальского края.

Заключение

Специализированные массивы высокого качества по основным климатическим параметрам, подготовленные во ВНИИГМИ-МЦД, позволили рассчитать в соответствии с рекомендациями ВМО климатические нормы за три десятилетия и исследовать региональные особенности их изменения на территории России. Разности климатических норм, полученные в данной работе, могут рассматриваться как один из показателей изменений климата, которые проявляются неодинаково в различных регионах страны. В последнее десятилетие на территории России выявлено замедление потепления во все сезоны. Нормы 1991-2020 гг. по осадкам летом уменьшились на большей части страны, однако значительное увеличение осадков получено в южных районах Якутии, Амурской области и Приморье, где на отдельных метеорологических станциях разность норм превышает 20 мм. В режиме атмосферного давления на уровне моря наибольшие изменения выявлены зимой: на ЕТР отмечалось значительное уменьшение ат-

мосферного давления, обусловленное увеличением циклоничности, а на АТР – рост атмосферного давления, обусловленный ослаблением Алеутской депрессии и смещением на Чукотку вторичного ядра Сибирского антициклона. На территории страны преобладают положительные значения разности по максимальной высоте снежного покрова, но для большинства районов они не превышают 5-10 см. Региональные особенности проявляются и в изменении значений разности норм, осредненных по квазиоднородным климатическим районам.

Литература

1. Бардин М. Ю. Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария. 1995. // Метеорология и гидрология. № 11. С. 24–37.
2. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н., Шаймарданов М.З., Швець Н.В. 2000. Изменчивость экстремальных климатических явлений на территории России. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 167. С. 16-31.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. М.: Росгидромет.
4. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И. 2014 Изменчивость климата Азиатской территории России в 1975-2012 гг. // География и природные ресурсы. № 4. С.13-21.
5. Ипполитов И.И., Кабанов В.В., Логинов С.В., Харюткина Е.В. 2008. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975-2005 гг. // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. №1(4). С. 323-344.
6. Кислов А.В., Л.М. Китаев, В.М. Евстигнеев. 2009. Изменение снежного покрова при прогнозируемом изменении потеплении климата в XXI в. (на примере Восточно-Европейской равнины // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. № 5. С. 35-41.
7. Коршунова Н.Н., Швець Н.В. 2014. Изменение норм основных климатических параметров на территории России за последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД, Вып. 178. С.11-24.
8. Коршунова Н.Н., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Давлетишин С.Г. 2018. Оценки экстремальности температурного режима и режима осадков для территории РФ и ее регионов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып.183. С. 20-30.
9. Коршунова Н.Н., Давлетишин С.Г., Аржанова Н.М. 2021. Изменчивость характеристик снежного покрова на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология, том 7, № 1, с.80-100.
10. Коршунова Н.Н., Давлетишин С.Г. 2021. Изменение индексов экстремальности на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып.189.
11. Коршунова Н.Н., Дементьева Т.В. 2023. Изменение характеристик облачности на территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. № 3(389), с. 139-151.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

12. *Попова В.В.* 2018. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариации крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундаментальная и прикладная климатология*, том 1, с. 84-111.

13. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм – ВМО № 1203. 2017. 21 с.

14. Семнадцатый Всемирный метеорологический конгресс: Сокращенный окончательный отчет с резолюциями. Женева, 2015. ВМО № 1157.

15. *Belokrylova T., O. Bulygina, V. Razuvaev.* 1992. Temperature Pattern variability on the USSR Territory in 1931-1990 // *Proceedings of the Sixteenth Annual Climate Diagnostics Workshop*, Los Angeles, October 28 – November 1 1991. Los Angeles: Dept. of Atmospheric Sciences University of California, P. 173-178.

16. Commission for Climatology Sixteenth session. Heidelberg, 3–8 July 2014. Abridged final report with resolutions and recommendations. WMO-№ 1137. С. 68.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ В РОССИЙСКИХ РЕГИОНАХ¹

А.В. Чернокульский^{1,2*}, А.В. Елисеев^{1,3}, Ф.А. Козлов, М.В. Курганский¹,
И.И. Мохов^{1,3}, В.А. Семенов^{1,2}, А.А. Спрыгин⁴, А.Н. Шихов⁵, Ю.И. Ярынич^{1,3}

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

² *Институт географии РАН, Москва*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

⁴ *НПО «Тайфун», Обнинск*

⁵ *Пермский государственный университет, Пермь*

**a.chernokulsky@ifaran.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований пространственно-временной динамики и условий формирования конвективных опасных явлений погоды (КОЯП), включающих сильные ливни, смерчи, шквалы, крупный град. Проведена диагностика пространственно-временной изменчивости повторяемости и интенсивности КОЯП в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации. Результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных конвективных явлений имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных – к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при оценке рисков, связанных с КОЯП и разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

Ключевые слова: смерч, шквал, сильный ливень, крупный град, индексы неустойчивости, реанализ, спутниковые данные

Происходящий в последние десятилетия рост приповерхностной температуры и влажности воздуха, а также увеличение вертикального градиента температуры способствуют интенсификации атмосферной конвекции и могут приводить к усилению и учащению конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) (Чернокульский и др., 2022; Мохов, 2022, 2023). К семейству КОЯП обычно отно-

¹ Работа является расширением статьи Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

сят крупный град (обычно диаметром более 2 см), шквалы со скоростью более 25 м/с, смерчи (чаще всего первой и выше категории по шкале Фудзиты), сильные ливни, вызывающие в том числе паводковые наводнения на реках. КОЯП в подавляющем большинстве случаев связаны с прохождением мульти-ячейковых и суперъячейковых облаков, так называемых опасных конвективных штормов («severe convective storms»), которые также характеризуются повышенной молниевой активностью.

В России с КОЯП связаны существенные негативные последствия, включая разрушение зданий и объектов инфраструктуры, гибель людей, сплошное повреждение лесного покрова. Так, за последнее десятилетие такие явления привели к экономическому ущербу в несколько десятков миллиардов рублей и гибели более 300 человек, в том числе, из-за ливневых осадков и вызванных ими наводнений в Крымске в 2012 году (Meredith et al., 2015), воздушных смерчей в Янауле (2014 г.) (Чернокульский и др., 2015), Рузском районе Московской области (2016 г.), Курганской области (2017 г.) (Chernokulsky et al., 2020), мощных шквалов на севере Европейской территории России в 2010 году (Chernokulsky et al., 2022), в Москве в 2017 году, на юге Сибири в 2020 году (Shikhov et al., 2024), в Поволжье в 2023 году.

Знания о статистике подобных явлений, их межгодовой изменчивости, механизмах и условиях их формирования до сих пор являются фрагментарными. Эта фрагментарность и малый пространственный масштаб явлений обуславливают наличие нерешенных задач в области предсказуемости этих явлений на разных временных масштабах – от задач повышения качества сверхкраткосрочного прогноза (интенсивности, места и времени формирования явлений) до задач оценки связанных с такими явлениями долгосрочных рисков для населения и различных отраслей экономики, в том числе в условиях меняющегося климата.

В данной работе представлен анализ изменения повторяемости и интенсивности КОЯП в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации – данных наземных наблюдений, спутниковой информации и данных реанализа. Работа основана на данных, опубликованных в статье (Чернокульский и др., 2022).

Для оценки повторяемости событий КОЯП использовались срочные данные стандартных метеорологических наблюдений с 521 российской станции (Булыгина и др., 2014) за 1966–2020 гг. (для ветра – с 1977 г.). Анализировался теплый период года с апреля по сентябрь. На основе этих данных рассматривались как непосредственно события КОЯП (экстремальные ливни, сильный ветер), так и другие переменные, характеризующие повторяемость развития атмосферной конвекции (но не интенсивности): сумма всех ливневых осадков, закрытая кучево-дождевыми облаками доля небосвода в дневное время, град любой интенсивности, наличие гроз. Повторяемость рассчитывалась, как отношение количества таких дней (например, грозových дней или дней с градом) к общему числу дней с апреля по сентябрь. Ливневые осадки рассчитывались согласно методике (Чернокульский и др., 2018).

На основе спутниковых данных Landsat/Sentinel-2 о ветровалах оценена повторяемость и интенсивность смерчевых и шкваловых событий, вызвавших данные ветровалы (за 1986–2021 гг.). На основе спутниковых данных MODIS оценена высота верхней границы облаков глубокой конвекции (за 2002–2021 гг.), которая является косвенным индикатором интенсивности конвекции. На основе данных реанализа ERA5 оценена повторяемость условий, характерных для развития умеренных и интенсивных КОЯП за период с 1959 по 2020 гг. (в работе (Чернокульский и др., 2022) подобная оценка сделана для более короткого периода, с 1979 по 2020 гг.).

Для оценки повторяемости сильных шквалов и смерчей (первой и выше категории по шкале Фудзиты) привлекалась информация о ветровалах в лесной зоне европейской территории России (Shikhov et al., 2020) за 1986–2021 гг., основанная на идентификации ветровалов по спутниковым данным Landsat и Sentinel-2 и их последующей проверке с помощью снимков высокого разрешения.

В качестве независимой оценки общей интенсивности конвективных процессов также привлекались спутниковые данные о высоте облаков глубокой конвекции, рассчитанной по данным MODIS для различных характеристик облаков. Высота облаков глубокой конвекции рассчитывалась за месяц для региона Северной Евразии (45–70° с.ш., 30–150° в.д.), как средняя высота всех соответствующих пикселей в этом регионе в данный месяц. Было проанализировано изменение высоты за период 2002–2021 гг. Из-за существенного объема исходных данных анализ был ограничен июлем и наблюдениями со спутника Terra.

Для оценки условий, характерных для образования КОЯП, использовался т.н. «ингредиентный подход» (Doswell et al., 1996). В рамках этого подхода были проанализированы значения индексов конвективной неустойчивости (и их критических значений), формализующих специфические условия атмосферы, характерные для формирования КОЯП. Основой расчета индексов были данные современного реанализа ERA5 с высоким пространственным (около 30 км) вертикальным (20 уровней от поверхности до высоты 300 гПа) и временным разрешением (1 час). Для региона Северной Евразии для периода 1959–2020 гг. рассчитано более 50 различных индексов конвективной неустойчивости – термодинамических, динамических, композитных. В данной работе был проведен анализ изменений величины лишь некоторых из них. Были рассчитаны изменения средних значений индексов (за период с апреля по сентябрь) и повторяемости ряда критических значений.

Межгодовая изменчивость рассмотренных переменных аппроксимировалась линейным трендом, рассчитанным на основе непараметрической медианной оценочной функции Тейла–Сена, менее чувствительной к выбросам, чем стандартный метод наименьших квадратов. Уровень значимости тренда оценивался на основе ранговой корреляции Манна–Кендалла. Более подробная информация об используемых данных и подходах представлена в работе (Чернокульский и др., 2022).

Согласно анализу данных наблюдений на метеорологических станциях, для характеристик ливневых осадков — суммы осадков во время всех ливневых до-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ждей, суммы осадков во время экстремальных ливней (95го перцентиля), вклада этих ливней в общую сумму осадков — отмечаются согласованные и значимые положительные изменения (рис. 1).

Статистически значимый рост рассмотренных характеристик ливневых осадков отмечается на большинстве станций, особенно сильный на юге Сибири и юге Дальнего Востока (до 8% за десятилетие на отдельных станциях). Наименьшие изменения (как по величине, так и по количеству станций со статистически значимым трендом одного знака) отмечены на юге европейской территории России и юге Урала.

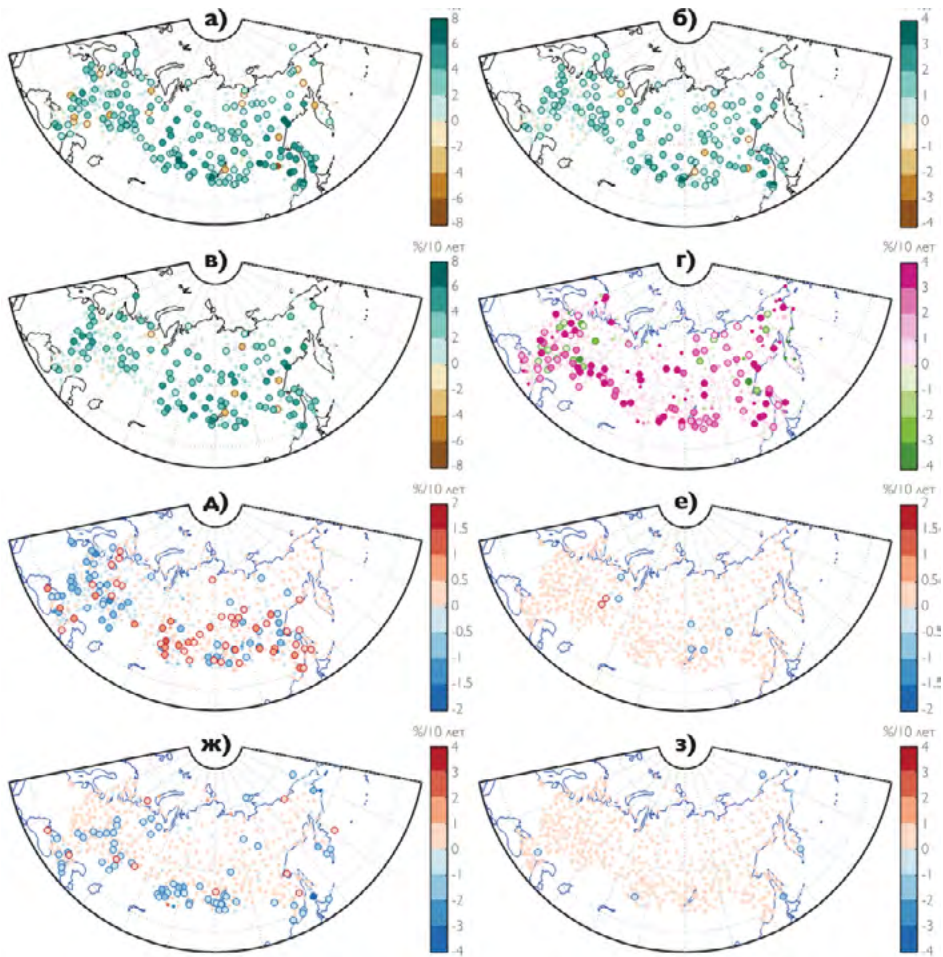


Рис. 1. Тренды по данным станционных наблюдений в теплый период года (апрель-сентябрь) для суммы ливневых осадков (а), суммы ливневых осадков 95-го перцентиля (б), вклада ливней 95-го перцентиля в общую сумму осадков (в), доли покрытия небосвода кучево-дождевыми облаками в дневное время суток (г), повторяемости дней с грозой (д), повторяемости дней с градом (е), повторяемости дней с максимальной скоростью ветра >20 м/с (ж) и 25 м/с (з). Для (а-е) тренды рассчитаны для 1966–2020 гг., для (ж, з) – для 1977–2020 гг. Крупными кружками показаны статистически значимые тренды на уровне 95%. (источник: Чернокульский и др., 2022)

Наряду с ростом ливневых осадков на территории России отмечается рост доли небосвода, занятой кучево-дождевыми облаками и числа грозовых дней, более выраженный на юге Сибири и Дальнего Востока. На фоне общего роста дней с грозой нами выявлен ряд регионов с разнонаправленными тенденциями, в частности, значимые тренды по сокращению числа дней с грозой отмечены для ряда станций на европейской территории России и Дальнем Востоке.

На основе анализа спутниковых данных MODIS для региона Северной Евразии выявлен статистически значимый рост верхней границы облаков глубокой конвекции, скорость которого составляет около 280 м десятилетие⁻¹ в дневное время и 330 м десятилетие⁻¹ в ночное время (рис. 2). Рост высоты конвективных облаков говорит об общей интенсификации грозовой активности в регионах Северной Евразии.

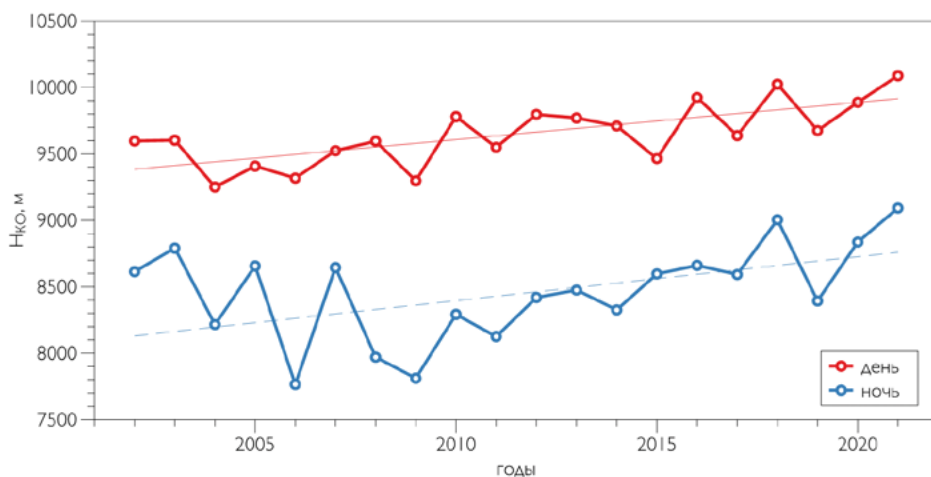


Рис. 2. Межгодовые изменения высоты облаков глубокой конвекции над Северной Евразией с 2001 по 2021 гг. в дневное и ночное время в июле по спутниковым данным MODIS Terra. Показано линейное приближение изменений, сплошными линиями показан статистически значимый тренд на уровне 99%, пунктирными – на уровне 90%. (источник: Чернокульский и др., 2022)

Существующие источники данных не дают возможности сделать какие-либо однозначные выводы об изменении градовой активности на территории России: подавляющее большинство станций демонстрируют незначимые тренды повторяемости града. Учитывая редкость и характерный масштаб сильных шквалов (>25 м/с) и смерчей, оценка их долгопериодной изменчивости по данным станционных наблюдений также затруднительна (Чернокульский и др., 2021). По данным наблюдений за максимальной скоростью ветра на метеорологических станциях отмечаются достаточно слабые изменения повторяемости дней со скоростью ветра ≥ 20 м/с, преимущественно отрицательные, при этом значимые изменения отмечены на востоке европейской территории России, юге Сибири и на побережье морей Тихого океана. Наибольшую согласованность показывают станции на юге Сибири, где большинство станций демонстрируют отрицатель-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ный значимый тренд ветровых событий в теплое время года (до -2% десятилетие⁻¹). При этом, для событий со штормовым ветром (≥ 25 м/с) тренды по станциям не значимы.

Мерой интенсивности шкваловых и смерчевых событий в лесной зоне может служить площадь сплошных ветровалов. Для лесной зоны европейской территории России с конца 1980-х гг. отмечается как значимый рост числа конвективных штормов, вызвавших смерчевые и шкваловые ветровалы (величина тренда составляет 2,5 события в десятилетие), так и суммарной площади этих ветровалов ($9,3 \text{ км}^2$ десятилетие⁻¹) (рис. 3). Отмечается существенная межгодовая изменчивость площади ветровалов, в частности, выделяются 2010 и 2021 гг., когда на западной периферии блокирующих антициклонов формировались так называемые события «дерево» — долгоживущие шквалы со временем жизни до 8 часов, которые стали причиной ветровалов длиной более 500 км и средней шириной около 20 км. Подобные события зарегистрированы на территории России впервые (Chernokulsky et al., 2022).

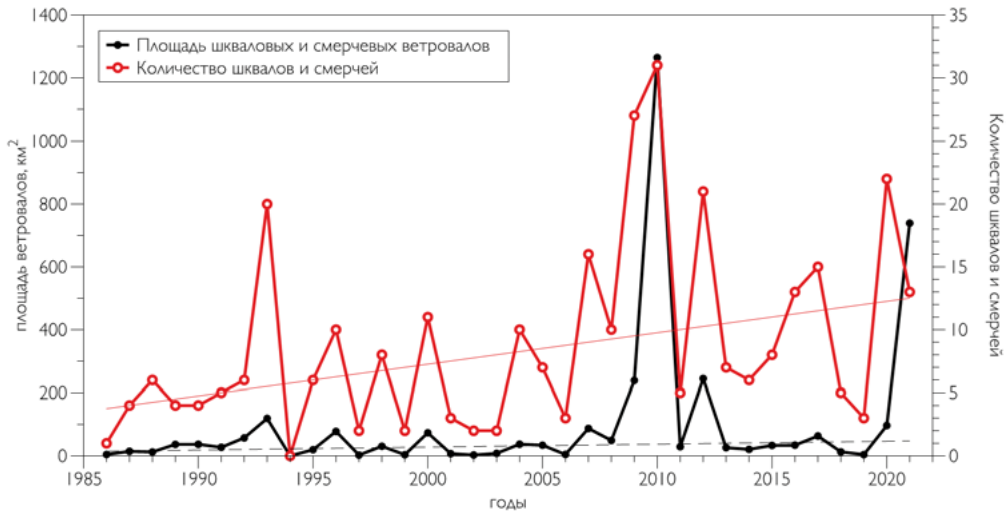


Рис. 3. Межгодовые изменения площади шкваловых и смерчевых ветровалов (для ветровалов с площадью $\geq 1 \text{ км}^2$) в лесной зоне европейской территории России, а также числа вызвавших их явлений (по расширенным данным (Shikhov et al., 2020)). Показано линейное приближение изменений, сплошными линиями показан статистически значимый тренд на уровне 99%, пунктирными – на уровне 90%

С учетом ограничения существующих данных наземных наблюдений о КОЯП, целесообразно оценивать повторяемость не самих событий, а условий атмосферы, характерных для их формирования. Такой анализ может быть осуществлен с использованием индексов конвективной неустойчивости, оцененных на основе данных радиозондирования, систем реанализа, расчетов с глобальными и региональными климатическими моделями, спутниковых данных о профиле температуры и влажности (Doswell et al., 1996; Doswell and Schultz, 2006; Курганский

и др., 2013; Шихов и др., 2022; Chernokulsky et al., 2023). Анализируются как изменения средних значений индексов, так и различных квантилей распределения, повторяемости превышения определенных пороговых значений. Например, пороговыми значениями могут служить 150 Дж кг^{-1} для индекса доступной конвективной потенциальной энергии CAPE и $400 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ для индекса WMAXSHEAR, представляющего собой комбинацию индекса CAPE и глубокого сдвига ветра (Taszarek et al., 2017). При превышении данных пороговых значений отмечается развитие, соответственно, умеренных или сильных КОЯП, а тренды повторяемости (рис. 4, 5) превышения этих значений могут служить индикатором изменений частоты самих явлений.

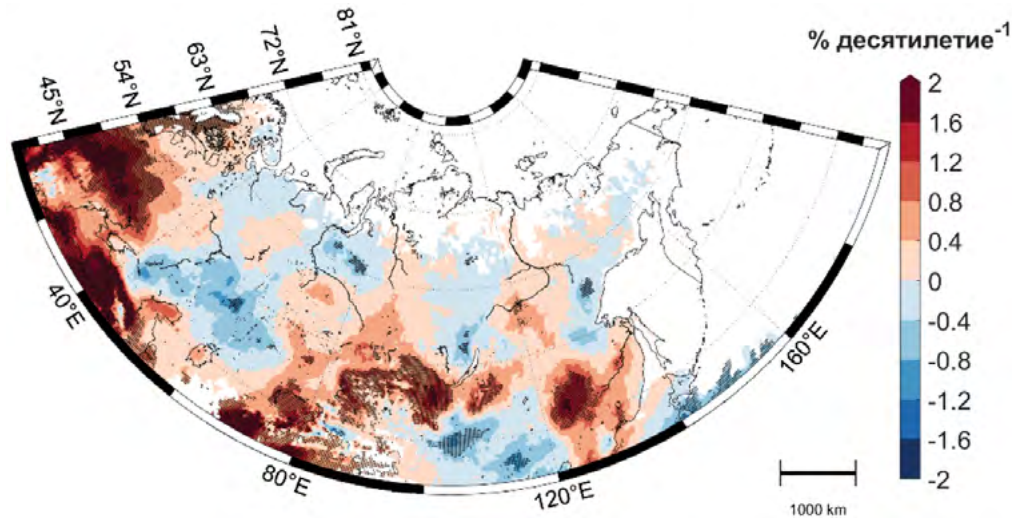


Рис. 4. Тренд повторяемости событий в летний период (июнь-август), благоприятных для развития умеренной конвекции ($\text{CAPE} \geq 150 \text{ Дж кг}^{-1}$), рассчитанных по данным ERA5 за период с 1959 по 2020 гг. Точками показаны статистически значимые значения тренда

Значения повторяемости рассмотренных критических значений индексов конвективной неустойчивости, рассчитанных по данным реанализа последнего поколения ERA5 за 1959–2020 гг., меняются разнонаправленно в различных регионах России.

В частности, отмечается ослабление конвективной активности на юге европейской территории России и Урала, где выявлено сокращение повторяемости критических значений индексов. На юге Дальнего Востока проявляются разнонаправленные и по большей части незначимые изменения индексов конвективной неустойчивости. На побережье Черного моря, в центральных областях европейской части России и на юге Сибири отмечены положительные тренды повторяемости критических значений индексов CAPE и WMAXSHEAR, которые указывают на рост вероятности развития КОЯП, в том числе интенсив-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ных, в данных регионах. В частности, в отдельных районах повторяемость событий, благоприятных для развития интенсивной конвекции (при которой и формируется комплекс КОЯП), растет с 1958 года со скоростью до 1% за десятилетие, то есть рост повторяемости за этот период составил около 6 процентных пунктов.

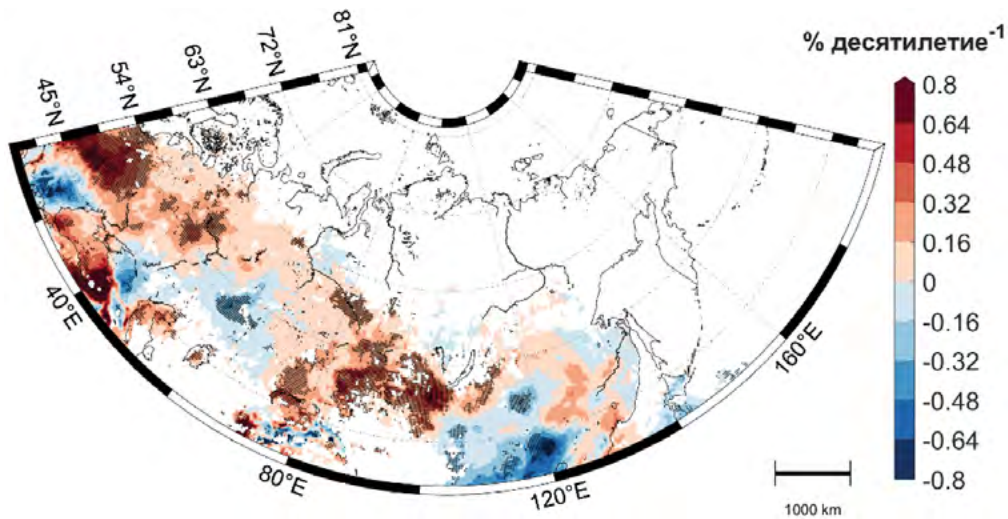


Рис. 5. Тренд повторяемости событий в летний период (июнь-август), благоприятных для развития интенсивной конвекции ($CAPE \geq 150$ Дж кг⁻¹), рассчитанных по данным ERA5 за период с 1959 по 2020 гг. Точками показаны статистически значимые значения тренда

В целом, результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных КОЯП имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных – к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей экономики к изменению климата, в первую очередь густонаселенных регионов центра европейской части России, черноморского побережье и юга Сибири, где ожидается наиболее сильная и значимая интенсификация КОЯП.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 24-17-00357.

Литература

1. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Александрова Т. М., Коршунова Н. Н. Атмосферные явления на метеорологических станциях России (сроки). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081, 2014.

2. Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 8. С. 40–50.

3. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // *Вестник РАН*. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.

4. Мохов И.И. Сезонные особенности изменений повторяемости экстремальных погодно-климатических явлений в российских регионах в последние десятилетия // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 11. С. 50–64.

5. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорология и гидрология*, 2022, №5, С.27–41.

6. Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г., Булыгина О.Н., Семёнов В.А. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // *Метеорология и гидрология*, 2018, №7, 5–17.

7. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // *Метеорология и гидрология*. 2015. №12. С.29–37.

8. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Куне Т. Смерчи в российских регионах // *Метеорология и гидрология*, 2021, №2, с.17–34.

9. Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Спрыгин А. А., Ярынич Ю. И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5. // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 6. С. 429–435. DOI: 10.15372/AOO20220601.

10. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-based study and numerical forecasting of two tornado outbreaks in the Ural region in June 2017 // *Atmosphere*, 2020, v.11, No. 11, p.1146, DOI: 10.3390/atmos11111146.

11. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmospheric Research*, 2022, Vol. 267, P. 105928 DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105928.

12. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Yu., Sprygin A. An Empirical Relationship among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud-Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // *Atmosphere*, 2023, Vol.14, P. 174, doi: 10.3390/atmos14010174.

13. Doswell C. A. III, Brooks H. E., Maddox R. A. Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. // *Weather and Forecasting*, 1996, vol. 11, pp. 560–581.

14. Doswell C. A. III, Schultz D. M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. // *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 2006, Vol. 1, No. 3, pp. 1–24. DOI: 10.55599/ejssm.v1i3.4

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

15. Meredith E.P., Semenov V.A., Douglas M., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. // *Nature Geosciences*, 2015. Vol. 8. P. 615–619. DOI: 10.1038/NGEO248.

16. Shikhov A., Antokhina O., Gochakov A., Azhigov I., Blinov D., Gazimov T., Kolker A., Tarabukina L., Yarinich Yu., Chernokulsky A. Severe convective outbreak in Siberia in May 2020: Event analysis and high-resolution simulation // *Atmospheric Research*, Volume 298, March 2024, 107139, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107139.

17. Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I., Semakina A. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // *Earth System Science Data*, 2020, V. 12, P. 3489–3512, DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.

18. Taszarek M., Brooks H. E., Czernecki B. Sounding-Derived Parameters Associated with Convective Hazards in Europe. – *Monthly Weather Review*, 2017, vol. 145, pp. 1511–1528. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1



2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИЗМЕНЕНИЙ
ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ/СЕАКЦ

Р.М. Вильфанд^{1*}, В.М. Хан^{1,2}, И.А. Куликова¹

¹ Гидрометцентр России

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

*romanvilfand@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются физические предпосылки и основные виды климатических прогнозов, выпускаемых мировыми метеорологическими центрами. С использованием результатов интегрирования глобальной полулагранжевой модели атмосферы Гидрометцентра России и ИВМ РАН ПЛАВ072L96 на внутрисезонных масштабах времени демонстрируются основные преимущества ансамблевых прогностических систем и вероятностных климатических прогнозов на внутрисезонных масштабах времени. Подчеркивается, что использование вероятностных подходов позволяет расширить временной интервал «полезности» прогнозов, получать априорные оценки их качества, а также оценки неопределенности и потенциальной экономической эффективности. Выделены новые тенденции и перспективные направления в развитии прогностической системы Гидрометцентра России/СЕАКЦ, связанные не только с развитием и расширением спектра используемых гидродинамических моделей, но и разработкой дополнительных приложений, предназначенных для взаимодействия с различными секторами экономики. Полученные выводы могут оказаться полезными при определении вектора будущих исследований, направленных на развитие российской системы климатического прогнозирования.

Ключевые слова: климатические прогнозы, гидродинамические модели, вероятность, неопределенность, верификация

Введение

Одним из важнейших видов продукции, поставляемой глобальными прогностическими центрами Всемирной метеорологической организацией (ВМО), в том числе и Гидрометцентром России/Северо-евразийским климатическим центром (СЕАКЦ), для широкого круга пользователей, включая федеральные, государственные и местные организации, гуманитарные учреждения, а также

отдельных индивидуумов, являются климатические прогнозы (КП). За последние несколько десятилетий национальные и международные инвестиции в наблюдения, исследования и моделирование климата привели к значительному прогрессу в решении экспериментальных и практических задач, улучшению научного понимания основных факторов изменения климата и на этой основе повышению качества климатических прогнозов.

В 2020 г. в рамках Всемирной программы исследования климата запущены новые перспективные проекты. Один из них «Моделирование и наблюдения системы Земля» (Earth System Modelling and Observations, (ESMO)) направлен на расширение границ прогнозирования и улучшение качества прогнозов на временных масштабах от недель до столетий. Другой проект «Региональная информация для общества» (Regional Information for Society (RIfS)) ориентирован на расширение связей между исследованиями климата и информационными потребностями общества, предоставления наилучшей и наиболее актуальной информации, адаптированной к запросам пользователя (Flato et al., 2023). В рамках проекта RIfS запланирован новый Скоординированный эксперимент по региональному даунскейлингу CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment), предполагающий использование региональных климатических моделей с большим пространственным разрешением, чем глобальные модели, участвующие в проекте CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Обозначен сдвиг парадигмы климатического прогнозирования в сторону моделей Земной системы с километровым (менее 10 км) пространственным разрешением (Gettelman et al., 2023).

В России важное значение для развития климатического прогнозирования имеют программы государственной поддержки. В октябре 2022 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации (РФ) утвержден новый инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», а также план мероприятий («дорожной карты») по реализации его первого этапа (2022 - 2024 гг.), направленный не только на улучшение качества климатического мониторинга и расширение базы научных знаний, но и на развитие многосекторального сотрудничества и разработку мероприятий по адаптации к климатическим воздействиям различных секторов экономики.

Физические предпосылки и виды прогнозов

Относительно терминологии и сроков прогнозов в метеорологической практике существует довольно много определений, базирующихся на самых разнообразных предпосылках, как формальных, так и физически обоснованных. В основном к КП относят прогнозы о будущих климатических условиях на временных масштабах от сезонов до десятилетий (Use of Climate Prediction, 2016). Однако в последние годы диапазон климатических прогнозов значительно расширился за счет включения внутрисезонных (недельных и ме-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

сячных) и междекадных интервалов времени. **Не детализируя особенностей разнообразных подходов к терминологии, с учетом основных изменений в парадигме климатического прогнозирования, будем считать климатическими прогнозы на срок от внутрисезонных (недельных) масштабов времени до межгодовой изменчивости (от одного года и/или нескольких лет).** Объектами КП являются статистические характеристики ожидаемых распределений такие как, например, осредненные за неделю, месяц и/или сезон, год аномалии прогностических переменных или вероятности разных категорий аномалий. Прогнозы на десятилетия в виду более значительной неопределенности относятся к климатическим проекциям.

В зависимости от физических факторов, ответственных за формирование атмосферных движений в контексте их пространственно-временных масштабов, различают: прогнозы с расширенным сроком действия (от 10 до 30 дней); долгосрочные метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до года; прогнозы межгодовой изменчивости (от одного до нескольких лет); прогнозы на десятилетия (Use of Climate Prediction, 2016).

Данная классификация сроков прогноза не является формальной, а строится на физических предпосылках, связанных с процессами, протекающими в климатической системе, в состав которой помимо атмосферы входят также океан, криосфера, биосфера и деятельный слой суши. Возможности КП связаны с влиянием внешних воздействий на атмосферу, которые изменяются медленнее, чем текущая погода, но которые могут оказывать заметное влияние на статистические характеристики метеорологических полей. На внутрисезонных масштабах времени при сохранении элементов памяти о начальном состоянии климатической системы, более значительным становится резерв памяти, связанный с влиянием состояния подстилающей поверхности, - распределением аномалий температуры поверхности океанов (ТПО), влажности почвы, протяженности и толщины морского льда, снежного покрова (Киктев и др., 2014).

На месячных и сезонных интервалах времени роль начального состояния атмосферы ослабевает и основным регулятором качества климатических прогнозов становятся внешние воздействия. В прогнозах межгодовой изменчивости климата важную роль играют *нелинейные взаимодействия процессов, протекающих в атмосфере, океане, криосфере, биосфере и деятельном слое суши, а также многообразие возникающих при этом обратных связей. При этом внешние воздействия включают антропогенный фактор, такой как выбросы парниковых газов, аэрозольные нагрузки, воздействующие на состав атмосферы и радиационные спектры* (Володин и др., 2017; Катцов и др., 2016; Катцов и др., 2019).

Новой областью научного познания и численного моделирования являются десятилетия (климатические проекции). Численные эксперименты проводятся для разных периодов, в том числе периодов, относящихся к середине и к концу текущего столетия с применением различных сценариев антропогенного воздействия, разрабатываемых, начиная с 90-х г. прошлого века, Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). Спектр этих сценариев

весьма широк и постоянно обновляется, отражая наиболее важные изменения в науке и социально-экономическом развитии общества. Подробный анализ эволюции сценариев дается в (Girod et al., 2009; Семенов и Гладильщикова, 2022).

В зависимости от способа представления прогностической продукции различают детерминистские и вероятностные прогнозы. В многочисленных исследованиях продемонстрированы преимущества вероятностного подхода не только для прогнозистов, но и для конечных пользователей в отношении информированности о неопределенности прогноза в контексте принятия решений (Murphy and Winkler, 1974; Murphy, 1977; Krzysztofowicz, 1998). Важность информации о неопределенности прогноза для пользователей подчеркивается в Рекомендациях ВМО [Рекомендации ВМО]. В России основы *вероятностного* научно обоснованного климатического прогнозирования были заложены Г.В. Грузой и Э.Я. Раньковой. Результатами их исследований стали не только новые объективные и субъективные методы вероятностного прогнозирования, но также способы оценки их качества и практического использования (Груза и Ранькова, 1983).

В последние годы выпуск вероятностных прогнозов осуществляется на базе ансамблевых прогностических систем, получивших широкое распространение в мировой метеорологической практике, начиная от методов краткосрочных прогнозов погоды и кончая методами прогнозов коротко-периодных колебаний климата (от сезонной до внутригодовой и межгодовой климатической изменчивости). Ансамбли прогнозов позволяют снизить величину неопределенности, связанную с первоначальными ошибками объективного анализа – начальными данными (лаговое интегрирование, метод бридинга или метод выращивания наиболее быстро растущих мод), а также ошибками, вызванными несовершенством самой модели (возмущения физики самой модели, устранение систематических ошибок, мультимодельный подход). Появляется реальная возможность с помощью ансамбля прогнозов аппроксимировать изменения функции распределения вероятностей, заменяя тем самым математическое решение проблемы, основанное на динамико-стохастических уравнениях и требующее больших и дорогостоящих вычислительных ресурсов (Ehrendorfer, 1994a, 1994b; Epstein, 1969).

Рассмотрим основные преимущества вероятностного представления прогностической информации и ансамблевых прогностических систем на базе результатов интегрирования новой версии модели ПЛАВ072L96 Гидрометцентра России (ГМЦ) и Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН).

Вероятностное прогнозирование

Исходной информацией для проведения исследования служили архивы вероятностных ретроспективных прогнозов трех основных градаций температуры воздуха и осадков (ниже нормы, норма и выше нормы (терцили)), полученные на базе новой версии модели ПЛАВ072L96 (Толстых, 2010; Фадеев и др., 2021)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

для 6 временных интервалов в отдельности: 1, 2, 3, 4 недели (1-7, 8-14, 15-21, 22-28 сутки соответственно) и 1 (1-30 сутки) и 2 (16-45 сутки) месяцы за период с 1991-2015 гг. (начальная дата прогноза 16 марта).

Вероятностное распределение решений в условиях неопределенности начального состояния атмосферы строилось, исходя из ансамбля прогнозов с различных (в пределах ожидаемой неточности анализа) начальных состояний. Возмущение траекторий различных участников ансамбля происходило также за счет стохастического описания физических процессов подсеточного масштаба (Alioiva et al., 2022).

Для получения количественных оценок предсказуемости, неопределенности и экономической полезности прогнозов использовались различные процедуры верификации вероятностных прогнозов и выделялись основные особенности мер качества, важные для пользователя и статистически устойчивые. Выполнялась агрегированная проверка прогностической системы ПЛАВ072L96 для территории Северной Евразии (0° – 140° в.д. и 40° – 85° с.ш.).

В качестве агрегированного показателя качества прогнозов использовался наиболее распространенный на практике критерий ROC, который рассчитывался для каждого временного интервала в отдельности. Интегральной оценкой служила площадь под кривой ROC, построенной в координатах f (ложные тревоги) и h (относительные доли оправдавшихся прогнозов) ($0 \leq AROC \leq 1$) при разных уровнях пороговой вероятности разделения событий для принятия решений. При равенстве долей оправдавшихся прогнозов и ложных тревог (отсутствии полезного сигнала) $AROC = 0.5$ (уровень случайного прогноза). Критерий ROC характеризует разрешающую способность прогностической системы (resolution) или, иными словами, способность «сортировать» наборы событий по подмножествам при разных распределениях наблюдаемых частот (Муравьев и Вильфанд, 2000; Standardized Verification System, 2002).

На рис. 1 приводятся кривые ROC, а также диаграммы надежности и гистограммы частот, характеризующие качество недельных и месячных вероятностных прогнозов температуры воздуха на территории Северной Евразии. Оценки площади под кривой ROC ($AROC > 0.7$) (рис. 1а и 1б) свидетельствуют об относительно высокой разрешающей способности прогностической системы (resolution) или, иными словами, способности «сортировать» наборы событий по подмножествам при разных распределениях наблюдаемых частот. Диаграммы ROC позволяют проводить сравнение эффективности вероятностных прогнозов с детерминистскими прогнозами. Точки на диаграммах соответствуют значениям коэффициентов ложных тревог (f) и частоты попаданий (h), полученных для контрольного интегрирования. Кривые ROC свидетельствуют о явном преимуществе вероятностного подхода по сравнению с детерминистским на месячном интервале интегрирования.

Для получения более полного представления о качестве прогностической системы использовались диаграммы надежности (reliability), а также гистограммы частот, представляющие частоту прогнозов как функцию вероятностей и харак-

теризующие избирательность (sharpness) (рис. 1в и 1г). Полученные результаты обнаруживают завышение вероятностей прогнозов, наиболее четко выраженное для градации ниже нормы.

Мерой надежности при анализе всей выборки является систематическая ошибка, при исключении которой надежность прогностической системы повышается. *Избирательность* (sharpness) относится к способности прогностической системы предсказывать экстремальные значения. Для вероятностного прогноза – это тенденция прогнозировать вероятности 0% и 100%, то есть тенденция к категорическому прогнозу.

На месячном интервале интегрирования по сравнению с первой неделей прогноза, как и следовало ожидать, уровень избирательности системы снижается. Для градации норма, вследствие большей неопределенности, характерно общеизвестное ухудшение качества прогнозов по всем рассмотренным критериям. На интервалах интегрирования (2, 3 и 4-неделя) качество прогнозов резко падает, и полезный сигнал отсутствует.

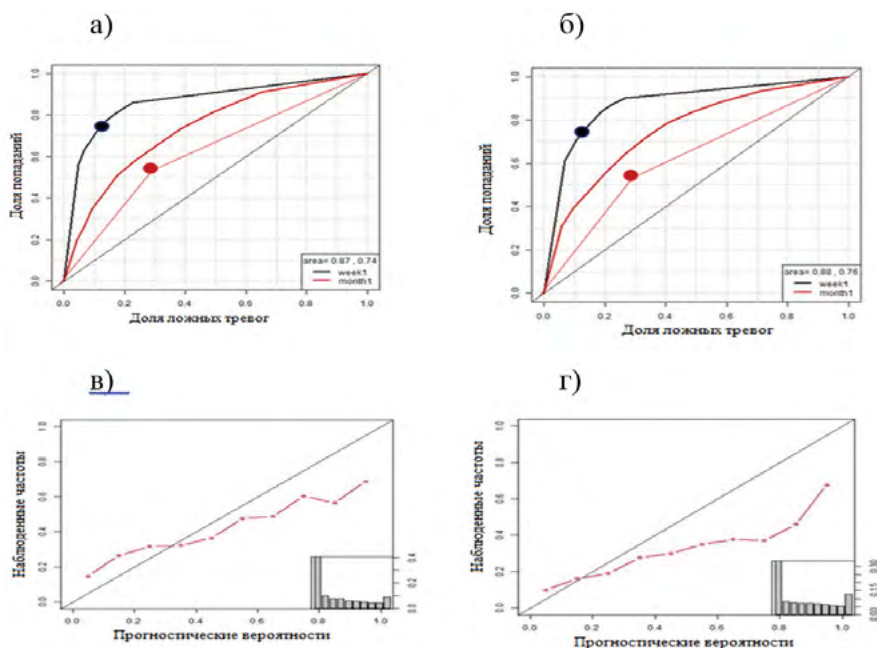


Рис. 1. Кривые ROC (а и б), диаграммы надежности (в и г) и гистограммы частот (в и г справа в нижнем углу) для недельных (черная кривая) и месячных (красная кривая) вероятностных прогнозов двух градаций температуры воздуха (выше нормы -слева и ниже нормы –справа) на территории Северной Евразии (0°- 140° в.д. и 40°- 85° с.ш.), полученные на базе ретроспективных прогнозов (1991-2015 гг.) версии модели ПЛАВ072L96 (начальная дата прогноза 16 марта). Точки на диаграммах ROC соответствуют контрольному интегрированию

Кривые ROC, построенные для прогнозов осадков, свидетельствуют, что в течение первой прогностической недели, качество прогнозов существенно луч-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ше уровня случайного прогноза ($AROC > 0.7$). На месячном интервале интегрирования качество прогнозов, как и следовало ожидать, снижается, но остается, в отличие от детерминистского прогноза, выше уровня случайного ($AROC \approx 0.6$). Диаграммы надежности и гистограммы частот свидетельствуют о значительно более низком уровне надежности и избирательности прогнозов осадков по сравнению с прогнозами температуры.

Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительном уровне как разрешающей способности, так и надежности прогностической системы ПЛАВ072L96 в контексте прогнозов двух градаций (выше и ниже нормы) температуры воздуха и осадков на недельном и месячном интервалах интегрирования при небольшом завышении вероятностей прогнозов. Качество прогнозов градации норма и для температуры воздуха, и для осадков приближается к уровню случайного. Использование ансамблей прогнозов позволяет улучшить разрешающую способность прогностической системы и обеспечить получение полезной информации, по сравнению с контрольным интегрированием, на более длительных интервалах времени.

Априорная оценка качества прогнозов

Ценность прогнозов любой прогностической системы значительно повышается, если, наряду с прогностической информацией, поставляются априорные оценки качества и неопределенности прогнозов. Прогноз качества гидродинамических прогнозов имеет историю почти полувековой давности. основополагающие идеи, стимулирующие развитие данного направления, были заложены еще в 80-х годах прошлого столетия в программе по так называемому динамическому прогнозированию с удлинённым сроком действия прогноза (Dynamical Extended Range Forecasting - DERF), разработанной, в Национальном метеорологическом центре (США) и касались в основном среднесрочных прогнозов погоды (Tracton et al., 1989). В историческом ракурсе среди многочисленных исследований, связанных с априорной оценкой качества прогнозов, можно выделить: статистические подходы, основанные на исследовании связей между качеством гидродинамических прогнозов и различными характеристиками состояния атмосферы; анализ режимов атмосферной циркуляции и определение устойчивых (хорошо прогнозируемых) и неустойчивых (плохо прогнозируемых) ситуаций; фильтрацию метеорологических полей с помощью временного осреднения, выделения главных компонентов, факторного анализа и т. д. (Chen, 1989; Kalnay and Dalcher, 1987; Муравьев и Куликова, 2000; Mo and Kalnay, 1991; Branstator, 1991).

Дальнейшие разработки проблемы априорной оценки качества прогнозов тесно связаны с использованием ансамблевых прогностических систем. Среднее по ансамблю дает лучшую (по сравнению с единичным, детерминированным прогнозом) оценку первого момента распределения состояний атмосферы

в будущем (в частности за счет того, что осреднение позволяет отфильтровать или удалить непредсказуемые эффекты в прогнозе), а разброс прогностических характеристик в ансамбле, выраженный с помощью среднеквадратического отклонения, может рассматриваться как показатель качества прогнозов по отношению к среднему по ансамблю. В табл. 1 приводятся коэффициенты корреляции (доверительные интервалы, полученные с использованием t-критерия Стьюдента) между средней абсолютной ошибкой прогнозов температуры воздуха и среднеквадратическим отклонением ансамбля прогнозов (61 член), рассчитанным относительно среднего по ансамблю и контрольного интегрирования для территории Северной Евразии (0-140° в.д. и 40°-85° с.ш.) и Северного полушария (20°-85° с.ш.) для летнего периода 2023 г. (10 начальных дат прогноза).

Как следует из табл. 1, разброс ансамбля может служить априорным показателем точности среднего по ансамблю детерминистского прогноза на месячном интервале интегрирования. За пределами месяца корреляционные связи не являются статистически значимыми. Большой разброс может свидетельствовать о низком качестве прогноза и, наоборот. Если возмущенные прогнозы (члены ансамбля) значительно отклоняются от контрольного прогноза и друг от друга, можно сделать вывод о значительной степени неопределенности и непредсказуемости атмосферы, и поставить вопросительный знак перед выдачей категорического прогноза.

Табл. 1. Коэффициенты корреляции (доверительные интервалы) между средней абсолютной ошибкой прогнозов температуры воздуха и среднеквадратическим отклонением ансамбля прогнозов, рассчитанным относительно среднего по ансамблю и контрольного интегрирования для территории Северной Евразии (0-140° в.д. и 40°-85° с.ш.) и Северного полушария (20°-85° с.ш.) для летнего периода 2023 г. (10 начальных дат прогноза)

Интервал интегрирования	Северная Евразия		Северное полушарие	
	Среднее по ансамблю	Контрольное интегрирование	Среднее по ансамблю	Контрольное интегрирование
Неделя 1	0.22(0.28-0.34)	0.26(0.20-0.31)	0.33(0.30-0.36)	0.33(0.28-0.33)
Неделя 2	0.30(0.25-0.36)	0.25 (0.19-0.30)	0.37(0.34-0.39)	0.31(0.28-0.34)
Неделя 3	0.33 (0.28-0.38)	0.29(0.24-0.35)	0.34(0.32-0.32)	0.28(0.25-0.31)
Неделя 4	0.23(0.18-0.29)	0.20(0.14-0.26)	0.29(0.26-0.32)	0.24(0.21-0.27)
Месяц 1	0.25(0.20-0.31)	0.23(0.17-0.28)	0.27(0.24-0.30)	0.23(0.20-0.26)
Месяц 2	0.08(0.02-0.14)	0.06(0.00-0.12)	0.14(0.10-0.17)	0.11(0.07-0.14)

Что еще более важно, ансамбль прогнозов предоставляет информацию, на основании которой можно определить вероятность альтернативных вариантов и рассчитать вероятности событий, связанных с экстремальными явлениями.

Потенциальная экономическая полезность прогнозов

В соответствии с рекомендациями ВМО климатическая продукция должна учитывать запросы и идеологию пользователей, чтобы облегчить им принятие решений и позволить с большим обоснованием прибегнуть к выбору той или иной информации. На практике обычно используется простая модель принятия решений, в которой все потенциальные пользователи климатических прогнозов могут ориентироваться на соотношение между стоимостью своих действий по предотвращению ущерба, связанного с климатом, и потерями, которые они несут в случае, если они не проводят защитные мероприятия. При этом экономическая полезность или, иными словами, экономический эффект прогностической системы определяется путем оценки *экономической зависимости* конкретного потребителя от прогнозируемого явления с помощью анализа затрат и потерь (cost-loss analysis) различной сложности (Richardson, 2000a, 2000b; Zhu et al., 2002; Муравьев и Куликова, 2004). По мнению автора (Myrne, 2002), оценка прогнозов «в терминах сэкономленных денег» намного важнее для пользователя, чем все прочие стандартные оценки.

Оценки экономической *полезности прогнозов относительно климатологии* (стоимости, эффективности, economic value) базируются на тех же таблицах сопряженности, что и кривые ROC. При этом в ячейки таблицы сопряженности добавляются возможные издержки, индивидуальные для каждого потребителя. Потенциальная экономическая эффективность прогностической системы представляется следующим образом (Zhu, 2002):

$$V = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} = \frac{Min[o, r] - (h + f)r - m}{Min[o, r] - o \cdot r},$$

где $E_{climate}$, $E_{forecast}$ и $E_{perfect}$ – ожидаемые затраты при использовании исключительно климатологии, методического прогноза и «идеального» прогноза; h и f – оценки вероятности попаданий и ложных тревог в таблице сопряженности «прогноз явления - факт», o – климатическая повторяемость явления, r – отношение возможных затрат и потерь потребителя (известное из экономики cost/loss-ratio).

Таким образом, экономическая эффективность прогностической системы зависит от двух основных параметров: h и f , характеризующих соответственно долю «попаданий» и долю ложных «тревог» (т.е. качество прогнозов) и используемых также при расчетах параметра ROC. С другой стороны, величина V определяется климатической повторяемостью явления и соотношением между затратами и потерями потребителя r . Если $V < 0$, то прогностическая система обходится пользователю дороже, чем климатическая информации. Наряду с параметром V для оценки экономической полезности прогнозов используется так называемый показатель Клейтона (Clayton skill score (CSS)) (Forecast Verification, 2012), характеризующий диапазон соотношений затрат/потерь, при которых пользователи могут получить выгоду от прогнозов.

На рис. 2 приводятся оценки экономической эффективности (V) в зависимости от отношения между затратами и потерями потребителя (r) при прогнозе аномалий температуры воздуха и осадков выше и ниже нормы на недельном и месячном (с заблаговременностью 0 и 15 дней) интервалах интегрирования. Как и следовало ожидать, наибольшие положительные значения эффективности (V) наблюдаются на недельном интервале интегрирования. На месячном интервале интегрирования с нулевой заблаговременностью положительный эффект, хотя и уменьшается, но сохраняется. При этом круг пользователей, характеризующийся определенными соотношениями затрат/потерь, сужается. Месячные прогнозы с заблаговременностью 15 дней с экономической точки зрения являются невыгодными.

Для осадков данные закономерности относительно сроков прогноза сохраняются. Однако в целом экономическая эффективность (параметр V) и диапазон полезности (параметр CSS) прогнозов по сравнению с температурой воздуха уменьшаются.

Анализ затрат и потерь (cost-loss analysis), основанный на использовании вероятностных прогнозов, позволяет максимизировать экономическую ценность для любого конкретного пользователя (соотношения затрат/потерь) за счет выбора конкретного порогового значения вероятности. Данное обстоятельство определяет существенные преимущества вероятностных прогнозов, т.к. ни одна из пороговых вероятностей (т.е. детерминированный прогноз) не будет оптимальной для широкого круга пользователей с разным соотношением затрат/ потерь.

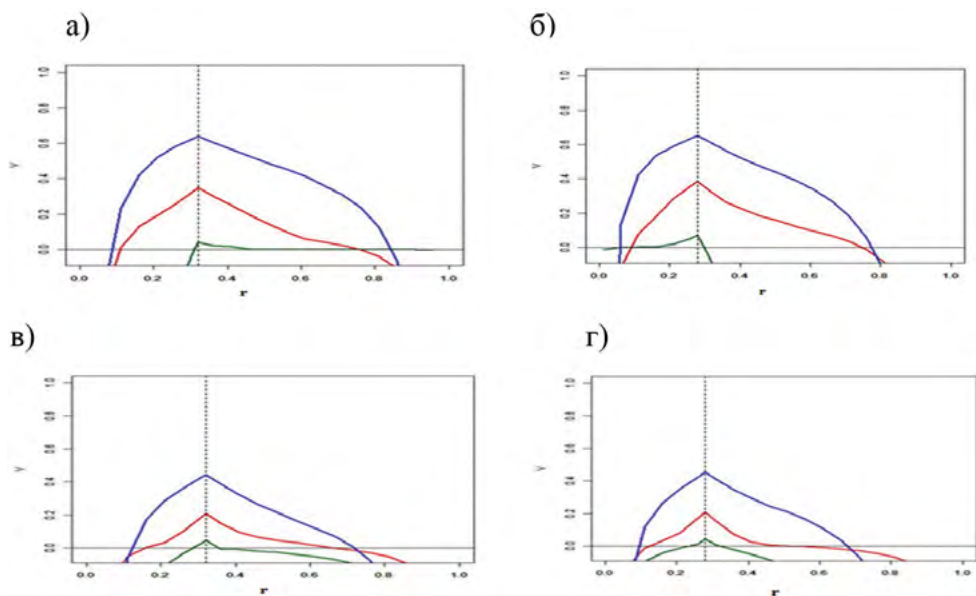


Рис. 2. «Экономическая эффективность» прогнозов: а) и в) выше нормы; б) и г) ниже нормы аномалий температуры воздуха (верхняя панель) и осадков (нижняя панель) на недельном (синяя кривая) и месячном (красная кривая с заблаговременностью 0 и зеленая - 15 дней) интервалах интегрирования. Исходная информация: ретроспективные прогнозы ПЛАВ072L96 (начальная дата прогноза 16 марта)

Новые тенденции в развитии системы климатических прогнозов в Гидрометцентре России/СЕАКЦ

Долгосрочные прогнозы Гидрометцентра России на протяжении многих десятилетий базировались на использовании синоптических и статистических методов. Опыт составления месячных и сезонных прогнозов, накопленный в советское время и получивший признание за рубежом (Livezey and Janison, 1977), находит применение в оперативной практике ГМЦ/СЕАКЦ и в настоящее время. В последние годы в связи с бурным развитием вычислительных и информационных технологий основные акценты в развитии и совершенствовании климатических прогнозов переносятся в область гидродинамического моделирования.

В целях повышения качества гидродинамических прогнозов в Гидрометцентре России/СЕАКЦ на регулярной основе ведутся исследования, направленные на более полное задействование потенциально важных резервов долгосрочной предсказуемости. Новая версия модели ПЛАВ072L96 (Фадеев и др., 2021) с расширенным (до 61 члена) ансамблем прогнозов характеризуется более высоким разрешением: $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте, 96 уровней по вертикали (верхний уровень около 0,04 гПа). По сравнению с предыдущей версией в модель добавлено описание сопротивления неорографических гравитационных волн, а также воспроизведение динамики стратосферы. Существенные модификации связаны с усовершенствованием блока параметризации глубокой конвекции, пограничного слоя атмосферы, осадков и облачности, а также настройкой модели многослойной почвы, блоков описания процессов на поверхности и в растительности.

В результате тесного сотрудничества и унификации технологий сезонного и внутрисезонного прогнозирования ГМЦ и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) в состав прогностической продукции входят не только результаты интегрирования модели ПЛАВ072L96, но и спектральной модели атмосферы T63L25 ГГО (Мирвис и др., 2017), а также их комплекс (мультимодельные ансамбли).

Новое направление связано с внедрением в практическую деятельность ГМЦ/СЕАКЦ климатической модели, позволяющей, с одной стороны, повысить качество сезонных прогнозов, с другой, расширить временной диапазон прогнозирования от сезона до межгодовой и внутривековой изменчивости климата. В этих целях на базе климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5) реализована технология, в состав которой помимо блока динамики атмосферы, входят блоки динамики океана, морского льда и расчета эволюции концентрации аэрозолей (Vorobyeva and Volodin, 2021). Появление новой усовершенствованной версии модели ПЛАВ072L96, а также включение в прогностическую систему Гидрометцентра России/СЕАКЦ климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5) привело к существенным изменениям общей конфигурации системы прогнозов и позволило расширить состав мультимодельного ансамбля (модели ГМЦ, ГГО и

ИВМ РАН). В качестве дополнения к гидродинамическому блоку разработана процедура статистической коррекций (СК) месячных и сезонных гидродинамических прогнозов, основанная на концепции MOS (Model Output Statistics) с учетом выходных статистик модели ПЛАВ072L96 (Тищенко и др., 2015). Важным компонентом усовершенствованной технологии является также экспериментальный веб-ориентированный пользовательский интерфейс с расширенным функционалом визуализации и анализа климатических прогнозов (<http://seaks.meteoinfo.ru/ru/>).

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в Гидрометцентре России совместно с Институтом Вычислительной Математики РАН (ИВМ РАН) разработан метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели INM-CM5 и системы подготовки данных, внедренный в оперативную практику Гидрометцентра России/СЕАКЦ в качестве основного метода прогнозирования состояния климатической системы на срок до 5 лет (Хан и др., 2023).

С развитием и совершенствованием прогностической системы и расширением спектра прогностических ансамблей появляются реальные возможности не только для повышения качества КП, но и для выпуска прогнозов экстремальных характеристик (Круглова и др., 2019; Киктев и др., 2020; Standardized Precipitation, 2012). В оперативном режиме осуществляется выпуск предупреждений о неблагоприятных метеорологических условиях на внутрисезонных интервалах времени, которые размещаются на сайте СЕАКЦ и регулярно раз в неделю обновляются (Ганиева и др., 2017).

В последние годы одним из основных направлений деятельности СЕАКЦ является создание новых приложений для взаимодействия с пользователями. В этом контексте особое значение приобретает специализированная климатическая продукция и оценка ее качества. Наряду с разработкой прогностических методик проводятся исследования, ориентированные непосредственно на погодно-климатические воздействия, в частности, на здоровье и самочувствие человека (Емелина и др., 2023). Ведется также разработка дополнительных платформ, предназначенных для взаимодействия с различными секторами экономики (энергетика, сельское хозяйство, транспорт, здравоохранение и др.).

Одним из основных механизмов взаимодействия с пользователем являются региональные климатические форумы (СЕАКОФ), которые проводятся два раза в год в рамках деятельности СЕАКЦ (Хан, 2017). Новый формат проведения климатических форумов предполагает непосредственное участие представителей различных отраслей знаний, международных организаций и отраслей экономики. Развитие существующих и появление новых механизмов взаимодействия с пользователем может принести существенную экономическую выгоду, снизить риски и уязвимость общества по отношению к катастрофическим и неблагоприятным природным явлениям.

Заключение

Климатические прогнозы являются одним из важнейших видов продукции, поставляемой глобальными прогностическими центрами ВМО для широкого круга пользователей. Современные ансамблевые прогностические системы наряду с детерминистскими прогнозами позволяют осуществлять выпуск вероятностных прогнозов, которые являются наиболее адекватным способом представления информации о неопределенности прогноза. Использование вероятностного подхода позволяет расширить временной интервал «полезности» прогнозов от одной недели до месяца, а также получать априорные оценки качества прогноза и его потенциальной экономической эффективности.

Новые тенденции в развитии прогностической системы Гидрометцентра России/СЕАКЦ связаны, с одной стороны, с развитием и расширением спектра гидродинамических моделей, внедрением в оперативную практику метода сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы (на срок до 5 лет), с другой, выпуском специализированной климатической продукция, предназначенной для различных секторов экономики. Важную роль в развитии климатического обслуживания играют региональные климатические форумы, которые проводятся два раза в год в рамках деятельности СЕАКЦ.

Полученные выводы могут использоваться для дальнейшего развития и совершенствования системы климатического прогнозирования в Гидрометцентре России/СЕАКЦ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект РНФ № 22-17-00247 в ИВМ РАН.

Литература

1. Flato G.M., Dunne J., Fox-Kemper B. et al. New Directions in Climate Modelling: A World Climate Research Programme Perspective // WMO Bulletin. 2023. Vol. 72 (2). P. 4-6.
2. Gettelman A., Fox-Kemper B., Flato G., et al. Kilometre-Scale Modelling of the Earth System: A New Paradigm for Climate Prediction // WMO Bulletin. 2023. Vol. 72 (2). P. 14-18.
3. Use of Climate Prediction to Manage Risks // WMO-No. 1174, 2016. 39 p.
4. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Мирвис В.М. О предсказуемости экстремальных метеорологических явлений на временных масштабах до сезона // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации (сб. докладов). М.: Росгидромет, 2014. С. 54 – 66.
5. Володин Е. М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В. и др. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 164–178.
6. Катцов, В.М., Школьник И.М, Ефимов С.В. и др. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и

построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 1: Постановка задачи и численные эксперименты // Труды Главной геофизической обсерватории им.А.И. Воейкова. 2016. Т. 583. С. 7-29.

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

8. Girod B., Wiek A., Mieg H., Hulme M. The evolution of the IPCC's emissions scenarios // *Environ. Sci. Policy*. 2009. Vol. 12., is. 2. P. 103-118.

9. Семенов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 1. С. 75-106.

10. Murphy A. H. and Winkler R. L. Probability Forecasts: a Survey of National Weather Service Forecasters // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1974. Vol. 55(12). P. 1449–1452.

11. Murphy A. H. The value of climatological categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation // *Mon. Wea. Rev.* 1977. Vol. 105. P. 803—816.

12. Krzysztofowicz R. Probabilistic hydrometeorological forecasts: Toward a new era in operational forecasting // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998. Vol. 79. P. 243–252.

13. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Вероятностные метеорологические прогнозы // Л.: Гидрометеиздат, 1983. 271 с.

14. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part I: Theory // *Mon. Wea. Rev.* 1994a. Vol. 122. P. 703–713.

15. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part II: Applications // *Mon. Wea. Rev.* 1994b. Vol. 122. P. 714–728.

16. Epstein E.S. Stochastic dynamic prediction // *Tellus*. 1969. Vol. 21. P. 739-759.

17. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды // Обнинск: ФАО ФОР, 2010. 111 с.

18. Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А. и др. Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021. №1(379). С. 58-72.

19. Alipova K.A., Goyman G.S., Tolstykh M.A. et al. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model// *Russ. J. Numer. Anal. Math. Mod.* 202. Vol. 37 (63). P 331-347.

20. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки// *Метеорология и гидрология*. 2000. № 12. С. 24-34.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

21. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485) // Geneva, WMO, 2002. Vol. I, 21 p.
22. Tracton M. S., Mo K., Chen W. et al. Dynamical extended-range forecasting (DERF) at the National Meteorological Center // Mon. Wea. Rev. 1989. Vol. 117. P. 1604- 1635.
23. Chen W.Y. Another approach forecasting forecast skill // Mon. Wea. Rev. 1989. Vol. 117, no. 2. P. 427 - 435. 24.
24. Kalnay E. and Dalcher A. Forecasting forecast skill // Mon. Wea. Rev. 1987. Vol. 115. P.349 - 356.
25. Муравьев А.В., Куликова И.А. Устойчивость атмосферных процессов и априорная оценка качества гидродинамических прогнозов // Метеорология и гидрология. 2000. № 9, С. 6-19.
26. Mo K.C. and Kalnay E. Impact of sea surface temperature anomalies on the skill of monthly forecasts // Mon. Wea. Rev. 1991. Vol. 119, no. 12. P. 2771 - 2793.
27. Branstator G. Spatial filtering of daily and monthly mean forecasts. Extended abstracts submitted to the ICTP/WMO international technical conference on long-range weather forecasting research. (Trieste, Italy, 8 - 12 April 1991) //- WMO/Td No. 395. P. 35 - 38.
28. Richardson, D. S. Skill and economic value of the ECMWF ensemble prediction system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2000a. Vol. 126. P. 649–668.
29. Richardson, D. S. Applications of cost–loss models // Proc. Seventh ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems, Reading, United Kingdom, ECMWF. 2000b. P. 209–213.
30. Zhu Y., Toth Z. , Wobus R. et al. The economic value of ensemble-based weather forecasts // BAMS. 2002. Vol. 83. P. 73 – 82.
31. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С.17-26.
32. Mylne, K. R. Decision-making from probability forecasts based on forecast value// Meteor. Appl. 2002. Vol. 9. P.307-315.
33. Forecast Verification in Atmospheric Science // A Practitioner’s Guide. Second Ed., Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
34. Livezey R.E., Janison S.W. A Skill Analysis of Soviet Seasonal Weather Forecasts // Mon. Wea. Rev., 1977. Vol. 105, no. 112. P. 1491-1500.
35. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Пятилетний опыт оперативного прогнозирования метеорологических условий на срок до 45 суток на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-3 T63L25)// Труды ГМЦ. 2017. Вып.366. С.29—50.
36. Vorobyeva V.V., Volodin E.M. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2021. Vol. 73, no. 1. P. 1–12.

37. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А. и др. Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 121–132.

38. Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А. и др. Оценка изменений температурного режима по Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели Земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства // Метеорология и гидрология. 2023. №9. С.14-28.

39. Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Прогнозирование волн тепла на внутрисезонных масштабах времени // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1 (371). С. 95-108.

40. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Об оценке индекса экстремальности EFI // Метеорология и гидрология. 2020. №1. С. 5-22.

41. Standardized Precipitation Index // User Guide. — WMO, 2012. no. 1090. 16 p.

42. Ганиева Е.С., Хан В.М., Куликова И.А., Круглова Е.Н. Экспериментальная технология выпуска предупреждений о неблагоприятных метеорологических явлениях в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С.57 -67.

43. Емелина С. В., Хан В. М., Семенов В. А. и др. Использование сезонных гидродинамических прогнозов модели INM-CM5 для оценки сроков начала пыления березы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 4. С. 407–416.

44. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 5-13.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН

Е.М. Володин^{1,2,3*}, А.С. Грицун¹, В.В. Воробьева^{1,2}, М.А. Тарасевич^{1,4},
А.Ю. Черненко^{1,4}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

³Институт прикладной физики им. Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

**volodinev@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается воспроизведение изменений климата в 1850-2100 г с помощью двух версий модели климата ИВМ РАН, имеющих разную чувствительность к удвоению концентрации CO_2 . Показано, что обе версии модели показывают примерно одинаковый рост глобально осредненной температуры до 2025-2030 г, а заметные отличия в глобальной температуре начинаются после 2030 г. Основной причиной различий является различие в приходящей солнечной радиации. Рассматривается воспроизведение пространственного распределения изменения температуры в последние десятилетия.

Ключевые слова: Модель, климат, параметризация, температура.

Введение

Математические модели климата являются одним из основных инструментов исследования механизмов формирования современного климата, воспроизведения его наблюдавшихся изменений и оценки вероятных будущих изменений. Международное научное сообщество регулярно проводит сравнения таких климатических моделей, в которых все модели климата проводят численные эксперименты по одному и тому же протоколу. Последним по времени таким сравнением был проект CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6, Eyring et al. 2016). В рамках этого сравнения, в частности, проводится моделирование изменений климата, наблюдавшихся с 1850г, вероятных будущих изменений климата до 2100г, а также методические численные эксперименты, например, определение равновесной чувствительности к удвоению CO_2 (ECS) и неравновесного отклика на удвоение CO_2 (TCR). ECS определяется как равновесное увеличение глобально осредненной температуры воздуха у поверхности при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере, вычисляемое в предположении линейности отклика климатической системы на

воздействие (Gregory 2004). TCR определяется как увеличение глобально осредненной температуры воздуха у поверхности при увеличении концентрации CO_2 на 1% в год при удвоении, т.е. в годы 61-80. Участвовавшая в СМIP6 модель климата INMCM5 имеет ECS равную 1.8К, что является минимальным значением среди всех моделей СМIP6 (Meehl et al, 2020). TCR составляет для этой модели 1.3К, что также меньше, чем для других моделей СМIP6. В новой версии модели INMCM6 вследствие изменения физических параметризаций, в первую очередь облачности, ECS увеличилась до 3.7К, а TCR - до 2.2К. Поэтому возникает вопрос о том, насколько отличается воспроизведение уже наблюдавшихся изменений климата и вероятных будущих изменений при одном и том же сценарии для этих двух версий климатической модели. Этот вопрос является весьма актуальным, поскольку на настоящий момент неясно, какие именно величины ECS и TCR соответствуют реальной климатической системе, и лучшее или худшее соответствие модельных и наблюдаемых изменений климата могло бы приблизить нас к ответу на этот вопрос. Попытке ответить на этот вопрос посвящена данная работа.

Модель, численные эксперименты и данные наблюдений

Версия модели INMCM5, а также воспроизведение ею современного климата, описана в (Volodin et al., 2017), воспроизведение изменений климата в 1850-2014 гг. - в (Volodin and Gritsun, 2018), воспроизведение изменений климата в 2015-2100 гг. при различных сценариях – в (Володин и Грицун, 2020). Модель включает в себя атмосферный блок, блок динамики океана и морского льда, аэрозольный блок. Пространственное разрешение в атмосферном и аэрозольном блоках составляет 2×1.5 градуса по долготе и широте и 73 уровня по вертикали, в океанском блоке - 0.5×0.25 градуса и 40 уровней. Версия модели INMCM6 описана в (Володин, 2023). Она отличается от версии INMCM5 изменением некоторых параметризаций в атмосферном блоке. Так, диагностическая схема расчета облачности типа Смагоринского заменена прогностической схемой (Tiedtke, 1993). Это является основной причиной увеличения ECS. Подробно причины увеличения ECS рассмотрены в (Volodin, 2021). Вкратце - ECS увеличивается потому, что процесс перемешивания облачного воздуха с воздухом ненасыщенного окружения приводит к тому, что в случае более высокой температуры облаков, особенно облаков нижнего яруса в тропиках и субтропиках, становится меньше. Кроме того, была усовершенствована параметризация эволюции снежного покрова на суше (Chernenkov et al., 2024) и эволюции аэрозолей (Чубарова др., 2021).

С двумя версиями модели климата были проведены численные эксперименты по моделированию изменений климата в 1850-2100 гг. Для этого все воздействия на климатическую систему в 1850-2014 гг. были предписаны в соответствии с имеющимися наблюдениями (<https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/Guide/modelers.html#3-forcing-data-sets>), а для 2015-2100гг - в соответствии со сценарием ssp3-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

7.0. С каждой из двух версий модели проведен ансамбль из 10 численных экспериментов, отличающихся лишь начальными условиями. Начальные условия взяты из различных лет преиндустриального эксперимента, в котором все воздействия соответствуют 1850 г.

Для определения ECS с каждой версией модели проводился преиндустриальный эксперимент продолжительностью 150 лет и аналогичный эксперимент такой же продолжительности, стартующий с того же начального состояния, но в котором концентрация CO_2 в атмосфере задана в 4 раза большей. ECS вычислялась согласно (Gregory, 2004), эта методика является в настоящее время общепринятой. Для вычисления TCR с того же начального состояния проводился эксперимент, в котором концентрация CO_2 в атмосфере увеличивалась на 1% в год. При таком росте удвоение концентрации CO_2 происходит около 70-го года. Продолжительность этого эксперимента составляет 80 лет. TCR вычислялась как разность среднеглобальной температуры воздуха у поверхности, средней за 61-80 годы, в эксперименте с ростом CO_2 на 1% в год и в соответствующие годы преиндустриального эксперимента. Такой подход для вычисления TCR тоже является стандартным в настоящее время.

В качестве наблюдений глобально осредненной температуры воздуха у поверхности используются данные HadCRUT5 (Morice et al. 2020), для сравнения пространственного распределения изменения температуры с наблюдениями используются данные ERA5 (Hersbach et al., 2020).

Результаты

ECS для версии INMCM5 равна 1.8К, что является минимальным значением среди всех моделей CMIP6. Интервал значений ECS для моделей CMIP6 составляет от 1.8К до 5.7К, а среднее значение по всем моделям составляет около 3.74К (Meehl et al. 2020). В версии INMCM6 ECS составляет около 3.75К, то есть она близка к среднему по всем моделям CMIP6. В Meehl (2020) отмечено также, что ECS вычисленная по первым 20 годам экспериментов, составляет лишь 3.34К, а если при вычислении ECS исключить первые 20 лет, то получится значение 4.02К. Такое различие объясняется нелинейностью обратных связей. Для модели INMCM6 значение ECS, вычисленное по первым 20 годам, составляет около 3.3К, а значение, вычисленное без учета первых 20 лет, равно 4.0К. То есть и по этим показателям версия INMCM6 очень близка к среднему по всем моделям CMIP6. TCR составляет для версии INMCM5 около 1.3К, а для версии INMCM6 около 2.2К. Среднее по всем моделям CMIP6 значение равно примерно 2.0К. Величины TCR для двух рассматриваемых версий модели отличаются в меньшее число раз, чем величины ECS из-за того, что при более высоких значениях ECS равновесие достигается дольше, а также из-за нелинейности обратных связей. Поэтому следует ожидать, что и величина глобального потепления в версии INMCM6 будет больше, чем в версии INMCM5, но они будут отличаться в меньшее число раз, чем величины ECS.

На рис. 1 представлено отклонение среднегодовой глобально-осредненной температуры воздуха у поверхности в 1850-2022 гг. по данным двух версий модели и наблюдений HadCRUT5. Обе версии модели неплохо воспроизводят наблюдаемое потепление и его особенности, такие как замедление потепления в 1960-1970 гг., убыстрение в 1930-1940 гг. и начиная с 1980-х годов. В целом, в начале 21 века версия INMCM5, по-видимому, немного занижает величину потепления, а версия INMCM6, возможно, немного завышает. Коэффициент корреляции средней по ансамблю среднегодовой температуры с данными наблюдений для версии INMCM5 для 1960-2020 гг. составляет 0.88, а для версии INMCM6 – 0.92. Для 5-летних средних коэффициенты корреляции составляют соответственно 0.92 для INMCM5 и 0.94 для INMCM6, то есть версия INMCM6 воспроизводит временной ход глобальной температуры несколько лучше, чем версия INMCM5.

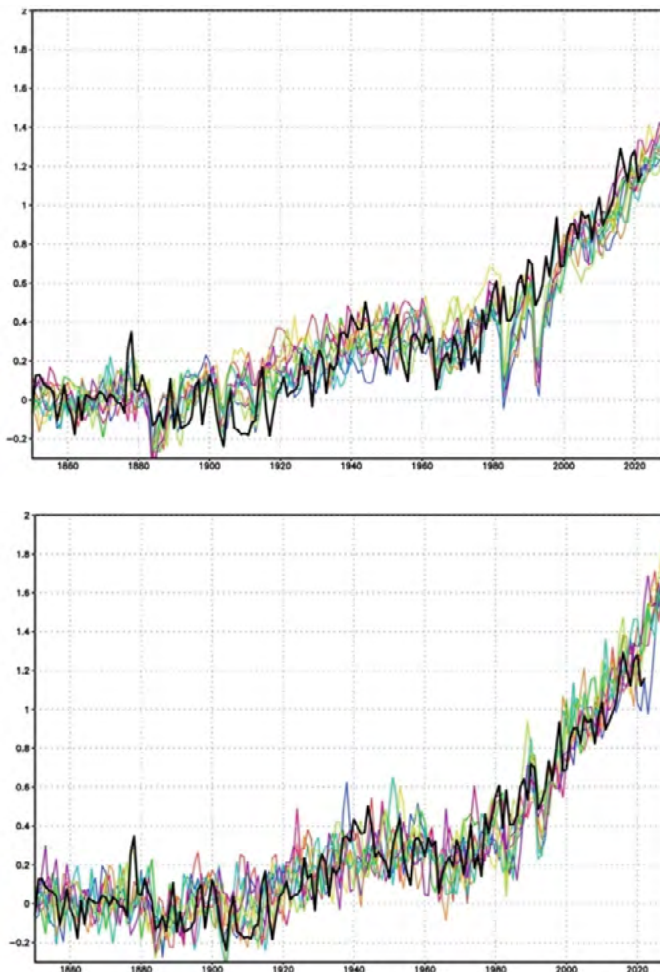
На рис. 2 представлено изменение среднеглобальной температуры до 2100 года при сценарии ssp 3-7.0. Данные двух версий модели начинают заметно отличаться друг от друга, начиная с 2020-2030 гг. С этого времени изменение температуры в каждом члене ансамбля версии INMCM6 превышает изменение в любом члене ансамбля INMCM5. К концу 21 века потепление в модели INMCM5 составляет около 3.5К, а в модели INMCM6 - около 5.3 К, т.е. примерно в 1.5 раза больше. В то же время, ECS для версии INMCM6 превышает значение для INMCM5 примерно в 2 раза. Это значит, что потепление в 2100г является существенно неравновесным, и в версии с большим значением ECS равновесие достигается дольше, что означает больший поток тепла в океан.

На рис. 3 представлен среднегодовой поток тепла в океан для двух версий модели. После 2000г потоки тепла в океан в двух версиях модели начинают существенно отличаться. К концу 21 века поток тепла в океан в версии INMCM5 составляет 1.2-1.6 Вт/м², а в версии INMCM6 – 2.5-3.0 Вт/м², то есть в два раза больше. Рассмотрение отдельных слагаемых баланса тепла на поверхности показывает, что больший поток тепла в океан в версии INMCM6 обеспечивается большим потоком приходящей солнечной радиации (рис. 4). До примерно 2000 г. поток приходящей солнечной радиации в обеих версиях модели меняется очень похожим образом. Общее небольшое уменьшение в 1850-2000 гг. связано с ростом оптической толщины антропогенных аэрозолей, а также водяного пара. Причинами резко выраженных минимумов является реакция климатической системы на вулканические извержения. После 2000 года в версии INMCM5 приходящее солнечное излучение продолжает постепенно уменьшаться вследствие роста концентрации водяного пара при не очень сильно меняющейся облачности. Уменьшение достигает 3-4 Вт/м² в конце 21 века. В версии INMCM6 в 21 веке происходит рост приходящей солнечной радиации вследствие уменьшения облачности из-за глобального потепления, который достигает 2-3 Вт/м² к концу 21 века. Однако, в настоящее время не существует оценок потока тепла на поверхности и оценок приходящей солнечной радиации столь точных, чтобы по ним можно было верифицировать наши две версии модели.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Для верификации моделируемых изменений климата сравним пространственное распределение изменения приземной температуры в 2002-2021 гг. и 1980-1999 гг. по данным ERA5 с аналогичной разностью по данным двух версий модели. На рис.5 приведена разность по данным ERA5, а на рис.6 – сравнение данных моделирования и данных реанализа. Если в данном узле сетки все 10 членов модельного ансамбля показывают изменение температуры большее, чем данные реанализа, то такая ячейка показана красным. Если все 10 членов модельного ансамбля показывают изменение температуры, меньшее чем данные реанализа, то такая ячейка показана синим. Остальные ячейки показаны белым. Можно видеть, что обе версии модели показывают большее потепление, чем наблюдалось, в тропиках Тихого океана, что связано с переходом от положительной к отрицательной фазе тихоокеанского декадного колебания в природе и отсутствием этого в моделях, а также большее потепление в Южном океане. В тропиках и субтропиках по данным версии INMCM6 происходит завышение потепления в большем



количестве ячеек, чем по данным INMCM5. Обращает на себя внимание и то, что версия INMCM6 занижает потепление в Арктике, в то время как в версии INMCM5 это не так сильно выражено. В целом, для версии INMCM6 цветные ячейки занимают несколько большую площадь, чем для версии INMCM5, но оценить статистическую значимость этого затруднительно.

Рис. 1. Отклонение среднегодовой среднеглобальной температуры воздуха у поверхности (K) от среднего за 1850-1899 гг. по данным версии INMCM5 (вверху) и INMCM6 (внизу). Разные цвета показывают разные члены модельного ансамбля. Черной жирной линией изображены данные HadCRUT5

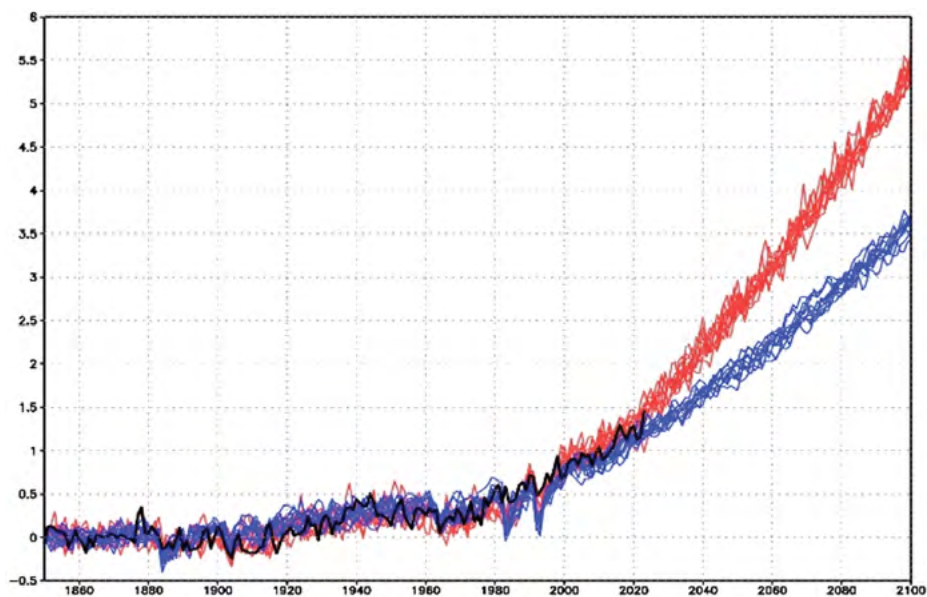


Рис. 2. Отклонение среднегодовой среднеглобальной температуры воздуха у поверхности (К) от среднего за 1850-1899 гг. по данным версии INMCM5 (синий) и INMCM6 (красный).
Черной жирной линией изображены данные HadCRUT5

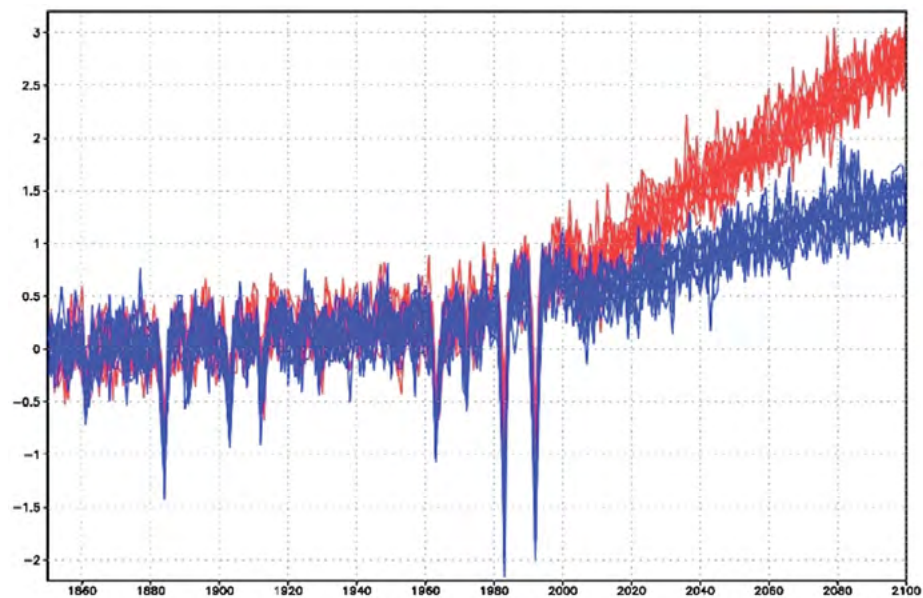


Рис. 3. Поток тепла в океан ($\text{Вт}/\text{м}^2$) по данным версии INMCM5 (синий) и INMCM6 (красный)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

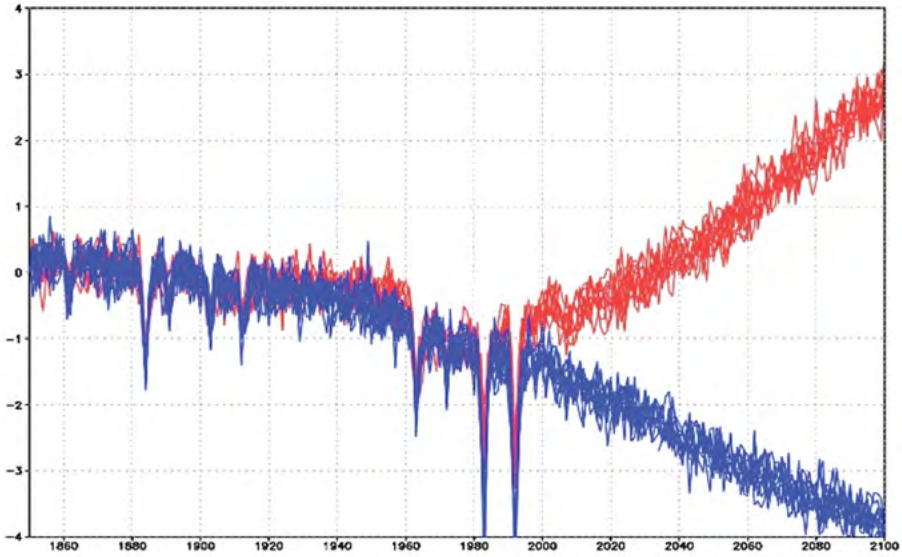


Рис. 4. Поток приходящей к поверхности Земли солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) по данным версии INMCM5 (синий) и INMCM6 (красный). Вычтено среднее за 1850-1899 гг.

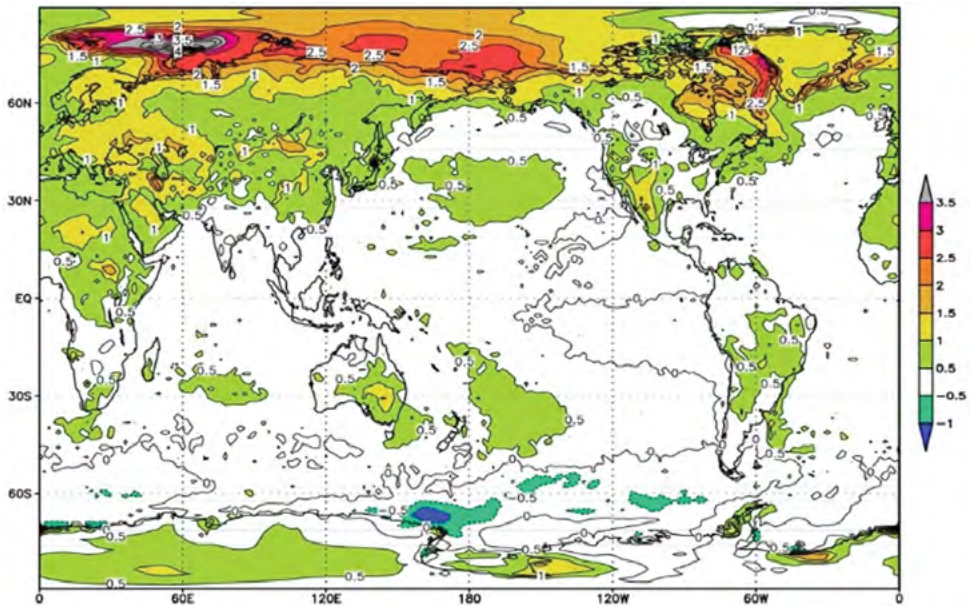


Рис. 5. Изменение температуры воздуха у поверхности (K) в 2002-2021 гг. по сравнению с 1980-1999 гг. по данным ERA5

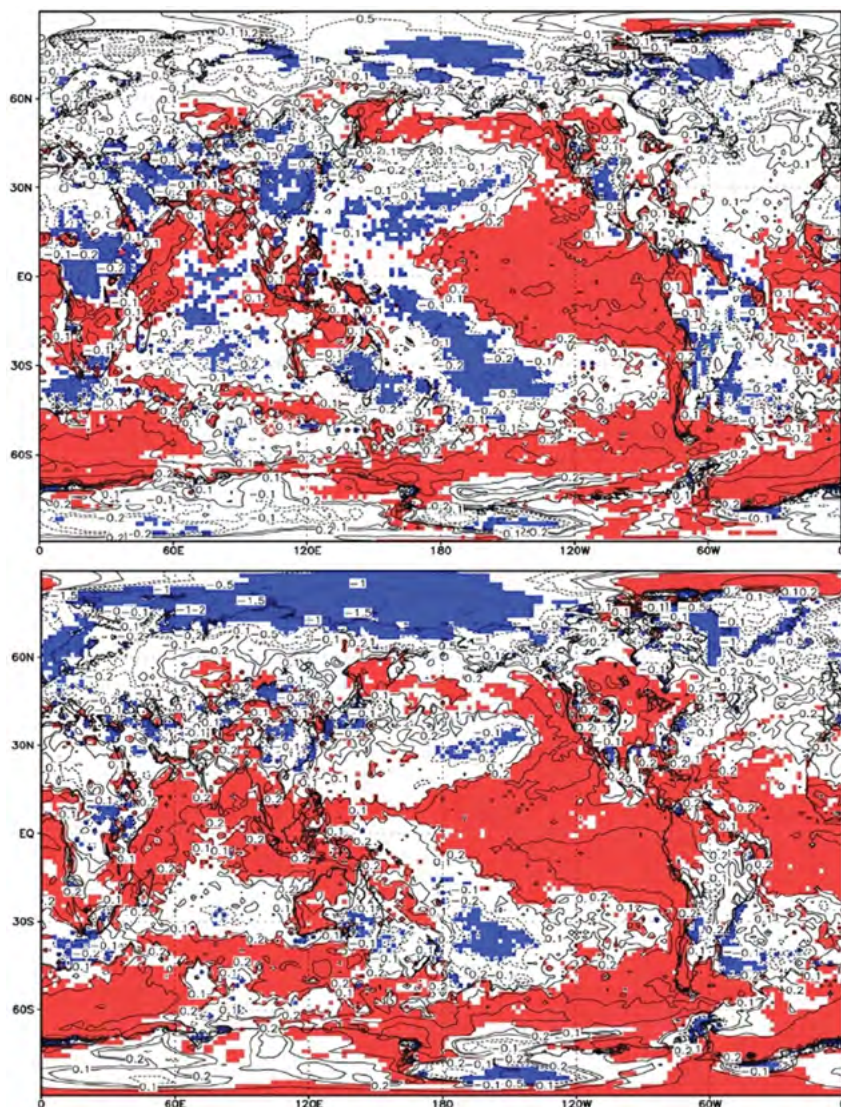


Рис. 6. Отличие изменения температуры воздуха у поверхности (К) в 2002-2021 гг. по сравнению с 1980-1999 гг. по данным версии INMCM5 и ERA5 (вверху) и INMCM6 и ERA5 (внизу). Красным показаны ячейки, где значения для каждого члена модельного ансамбля превышают значение для ERA5. Синим показаны ячейки, где значения для каждого члена модельного ансамбля меньше, чем значение для ERA5

Выводы

Рассмотрено воспроизведение изменений климата в 1850-2100 гг. в версии модели климата INMCM5 и INMCM6, которые отличаются параметризациями физических процессов в атмосфере, вследствие чего версия INMCM5 имеет ECS

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

равную 1.8К, а версия INMCM6 - 3.75К. Версия INMCM5 немного занижает величину глобального потепления к началу 21 века, а версия INMCM6 - немного завышает. Существенные отличия в глобально осредненной температуре начнутся лишь после 2020 г., и в конце 21 века глобальное потепление при сценарии ssp3-7.0 составляет для версии INMCM5 - 3.5 К, а для версии INMCM6 - 5.3 К. В 21 веке в версии INMCM6 имеет место значительно больший поток тепла в океан, чем для версии INMCM5, что обеспечивается, главным образом, различием в потоке приходящей к поверхности солнечной радиации. Наблюдаемые временные изменения глобально осредненной температуры получаются немного лучше в версии INMCM6, а воспроизведение пространственных особенностей наблюдаемого изменения температуры в последние десятилетия - в версии INMCM5, так что сделать однозначный вывод о том, какая версия модели лучше воспроизводит наблюдаемые изменения климата, и, следовательно, лучше прогнозирует будущие изменения, нельзя. Однако, в случае глобально осредненной температуры можно предположить, что наилучшей была бы версия, имеющая ECS большую, чем в версии INMCM5, но меньшую, чем в версии INMCM6.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке Российского научного фонда, грант 20-17-00190. Вычисления производились на суперкомпьютерах МСЦ РАН.

Литература

1. Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2020, Т56, N3, С.255-266. DOI 10.31857/S0002351520030128.
2. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2023, Т.59, N1, с.19-26. DOI 10.31857/S0002351523010133.
3. Чубарова Н.Е., Полюхов А.А., Володин Е.М. Совершенствование расчета эволюции сульфатного аэрозоля и его радиационных эффектов в климатической модели ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2021, Т.57. № 4. С. 421–431, DOI 10.31857/S0002351521040040.
4. Chernenkov A., Volodin E., Kostykin S., Tarasevich M., Vorobyeva V. Modification and Validation of the Soil–Snow Module in the INM RAS Climate Model // Atmosphere 2024, 15, 422. DOI 10.3390/atmos15040422.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization// Geosci. Model Dev., 2016, 9, 1937–1958, DOI 10.5194/gmd-9-1937-2016.
6. Gregory J. M., Ingram W., Palmer M., Jones G., Stott P., Thorpe R., Lowe J., Johns T., Williams K. A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity // Geophys. Res. Lett., 2004, 31, L03205, DOI: 10.1029/2003GL018747.

7. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis // *Q J R Meteorol. Soc.* 2020;146:1999-2049. DOI 10.1002/qj.3803.
8. Meehl G., Senior C., Eyring V., Flato G., Lamarque J-F., Stouffer R., Taylor K., Schlund M. Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models // *Sci. Adv.* 2020, 6, DOI 10.1126/sciadv.aba1981.
9. Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 126, e2019JD032361. DOI 10.1029/2019JD032361.
10. Tiedtke M. Representation of clouds in large-scale models // *Mon. Weather Rev.* 1993, V121, p. 3040–3061. DOI 10.1175/1520-0493.
11. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Y., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G. Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5 // *Clim. Dyn.*, 2017, V49, 3715, DOI 10.1007/s00382-017-3539-7.
12. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850-2014 with climate model INMCM5 // *Earth Syst. Dynam.* 2018, 9, 1235-1242, DOI 10.5194/esd-9-1235-2018.
13. Volodin E. The mechanisms of cloudiness evolution responsible for equilibrium climate sensitivity in climate model INM-CM4-8 // *Geophysical Research Letters*, 2021, 48, e2021GL096204. DOI 10.1029/2021GL096204.

ИЗМЕНЕНИЯ СТРАТОСФЕРЫ АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ В РАСЧЕТАХ МОДЕЛИ SOCOL4

П.Н. Варгин^{1,2*}, С.В. Кострыкин^{3,4}, А.В. Коваль^{5,6}, Е.В. Розанов^{7,8},
Т.Е. Егорова⁸, С.П. Смышляев⁶

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Московская область

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

⁴Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва

⁵Кафедра физики атмосферы Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург

⁶Кафедра метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического факультета, Санкт-Петербург

⁷Лаборатория озонового слоя и исследований верхней атмосферы Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург

⁸*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland*

**p_vargin@mail.ru*

Аннотация. Исследованы изменения динамических процессов стратосферы Арктики, влияющих на озоновый слой, по результатам расчетов химико-климатической модели SOCOLv4 с 2015 г. по 2100 г. по умеренному и жесткому сценариям роста парниковых газов (SSP2-4.5 и SSP5-8.5). Сравнение периодов 2080 - 2099 гг. и 2015 - 2034 гг. для марта показывает снижение температуры стратосферы на 5° - 10° и увеличение содержания водяного пара на 5% - 20%. Во 2-й половине XXI века выявлено 8 эпизодов с отрицательными аномалиями общего содержания озона (ОСО) до ~80 е.Д., что сравнимо с мартом 2011 г., но меньше, чем в марте 2020 г., когда в Арктике разрушение озона было максимальным. Выявлено усиление изолированности полярного вихря и рост объемов воздушных масс, с температурами достаточными для формирования полярных стратосферных облаков 1-го типа (NAT) в марте, что свидетельствует об усилении вихря весной к концу XXI века. В полярной нижней стратосфере при жестком сценарии выявлено увеличение концентраций жидких частиц водяного пара, серной и азотной кислоты (STS, H₂SO₄-H₂O-HNO₃), важных для активации озоно-разрушающих соединений. Выявленный по обоим сценариям значимый положительный тренд минимальных значений ОСО в марте свидетельствует в целом об увеличении содержания озона к концу XXI века. Проанализирована изменчивость среднезональной и остаточной меридиональной циркуляции, волновой активности.

Ключевые слова: изменение климата, озон, стратосферный полярный вихрь, остаточная меридиональная циркуляция, SOCOLv4.

Введение

Наблюдаемое и прогнозируемое увеличение концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере, что влияет на ее циркуляцию и химический состав, ускоряя восстановление концентрации озона к уровням, существовавшим до 1980 г. (WMO 2022; Baldwin et al., 2019). Несмотря на принятые и запланированные большинством стран меры по сокращению выбросов ПГ в рамках Киотского протокола и Парижского соглашения, рост концентраций ПГ, несомненно, продолжится в XXI веке.

Охлаждение стратосферы способствует увеличению концентрации озона выше 10 гПа, что обусловлено снижением галогенной нагрузки за счет реализации Монреальского протокола и его поправок из-за замедления температурно-зависимых циклов каталитического разрушения озона (Zubov et al., 2013; WMO 2022). Увеличение содержания других парниковых газов, таких как метан CH_4 , дополнительно способствует восстановлению озонового слоя в верхних слоях стратосферы посредством реакции $\text{CH}_4 + \text{Cl} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CHCl}$. Однако увеличение содержания оксида азота N_2O может усилить потерю озона за счет каталитических реакций с участием NO_x (Revell et al., 2012). Предполагается, что N_2O будет самым важным антропогенным соединением, препятствующим восстановлению озонового слоя на протяжении XXI века (Wang et al., 2014).

Хотя увеличение содержания озона в верхней стратосфере уже наблюдается и, вероятно, продолжится в ближайшие десятилетия, тенденции к восстановлению озонового слоя в нижней стратосфере менее очевидны. Например, выявлена статистически устойчивая отрицательная тенденция для озонового слоя между уровнями давления 146 гПа и 32 гПа в почти глобальном масштабе (55° ю.ш.– 55° с.ш.) (Ball et al., 2018). Среди возможных причин, которые могут способствовать уменьшению содержания озона в нижней стратосфере: изменение относительной силы нижней и верхней ветвей меридиональной циркуляции Брюера-Добсона (ЦБД) (Keeble et al., 2017); недавнее снижение солнечной активности (Arsenovic et al., 2018); влияние галогенсодержащих короткоживущих частиц и других газов, не учтенных Монреальским протоколом (Oram et al., 2017); увеличение выбросов неорганического йода (Karagodin-Doynel et al., 2021) и аэрозольной нагрузки (Andersson et al., 2015); спонтанное увеличение выбросов трихлорфторметана (ХФУ-11), нарушающее Монреальский протокол (Fleming et al., 2020); изменения высоты внетропической тропопаузы.

Анализ 20 климатических моделей проекта CMIP6, включая 4 модели с интерактивной химией, показал, что охлаждение нижней внетропической стратосферы, связанное с выбросами парниковых газов, может способствовать усилению стратосферного полярного вихря и, следовательно, истощению озона в арктической стратосфере, особенно при жестком сценарии роста концентраций парниковых газов в XXI веке (SSP5.8-5) (von der Gathen et al., 2021). Этот вывод подтвержден анализом результатов моделирования ИВМ CM5 (Vargin et al., 2022). Предполагается, что после 2050-х гг. динамические условия в стратосфере

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ре Арктики в некоторые зимы могут быть благоприятными для значительного разрушения озона в конце зимнего сезона, несмотря на продолжение снижения содержания озоноразрушающих соединений (ОРС) из-за реализации Монреальского протокола (von der Gathen et al., 2021).

Многочисленные эксперименты химико-климатических моделей (ХКМ) показывают, что ожидаемое восстановление озона в конце зимы будет зависеть не только от уменьшения содержания ОРС, но также из-за возможного сдвига стратосферного полярного вихря, приводящего к отрицательным аномалиям общего содержания озона над Северной Евразией и положительным над Северной Америкой. Уменьшение ледового покрова Арктики, по-видимому, способствовало устойчивому смещению полярного вихря в последние 30 лет в конце зимы в сторону Евразии (Zhang et al., 2018). Поэтому восстановление озона в конце зимы в некоторых внетропических регионах Северного полушария может происходить с задержкой.

Согласно модельным расчетам, увеличение концентрации ПГ будет сопровождаться ускорением ЦБД и усилением переноса атмосферных примесей. Модельные расчеты демонстрируют до конца XXI века увеличение восходящих движений в тропиках в верхней стратосфере на ~1% за десятилетие, а в нижней стратосфере – до ~2% за десятилетие, в результате средний возраст стратосферного воздуха уменьшится до 60 и 30 дней за десятилетие (Oberländer et al., 2013). Однако между модельными оценками и данными ассимиляции наблюдениями сохраняются значительные различия.

В настоящей работе исследуются изменения динамики стратосферы Арктики, связанных с состоянием стратосферного озона в течение XXI века с использованием модели климатической системы Земли SOCOLv4 (SOlar Climate Ozone Links, версия 4, далее - SOCOLv4), включающей интерактивную химию, важную для моделирования температуры, озона и динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы (Rieder et al., 2019; Naase and Matthes, 2019; Friedel et al., 2022).

ХКМ SOCOL4, эксперименты и методы анализа

Химико-климатическая модель (ХКМ) SOCOLv4 разработана на основе Модели земной системы Института метеорологии им. Макса-Планка (MPI-ESM1.2) и интерактивно связана с химическим блоком MEZON, модулями микрофизики, океана и биохимии океана (Sukhodolov et al., 2021).

ХКМ SOCOLv4 - спектральная модель с горизонтальной сеткой T63 (соответствующей разрешению по долготе - широте $\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$) и 47 вертикальными уровнями от поверхности до 0,01 гПа (~ 80 км). Шаг по времени - 15 минут для динамических и физических процессов и 2 часа для радиационных и химических. ХКМ SOCOLv4 моделирует ~ 100 химических составляющих, участвующих в 216 газовых реакциях, 72 реакциях фотолиза и 16 гетерогенных реакциях на поверхности или внутри частиц сульфатных аэрозолей и полярных стратосферных облаков.

Анализировались два эксперимента для периода с 2015 г. по 2099 г. по умеренному (SSP2-4.5) и жесткому (SSP5-8.5) сценариям роста концентраций парниковых газов проекта CMIP6. По сценарию SSP2-4.5 к концу XXI века концентрация CO_2 увеличится до ~ 600 ppm, а радиационное воздействие на $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ по сравнению с доиндустриальным периодом (до 1750 г.). По сценарию SSP5-8.5 радиационное воздействие увеличится на $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$, а концентрация CO_2 вырастет в 4 раза до ~ 1135 ppm. Глобальная температура поверхности вырастет на $\sim 3^\circ\text{C}$ и $\sim 5^\circ\text{C}$ к 2100 г. по этим сценариям соответственно. Каждый эксперимент состоял из 3-х ансамблевых расчетов с слегка меняющимися начальными условиями: $\sim 0.1\%$ возмущения концентрации CO_2 в первый месяц (Karagodin-Doeyennel et al., 2023).

Полярные стратосферные облака (PCO) играют важнейшую роль в разрушении озона поздней зимой и весной. PCO состоят из переохлажденного раствора трех соединений $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ (supercooled ternary solutions — STS) и кристаллического тригидрата азотной кислоты ($\text{HNO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (PCO I типа - NAT) и ледяных кристаллов (PCO II типа). PCO I типа формируются при температуре ниже -78°C , II типа – ниже -85°C . PCO обеспечивают поверхность для перехода нейтральных соединений HCl , HBr , ClONO_2 в Cl_2 , BrCl , и ClNO_2 . После проникновения солнечной радиации в полярную стратосферу эти соединения переходят в активные формы, что приводит к разрушению озонового слоя в каталитических циклах (Solomon et al., 1986).

Твердые частицы NAT PCO также ответственны за денитрификацию - оседание активного азота из стратосферы, что приводит к разрушению озона, препятствуя формированию неактивных резервуарных соединений. Поэтому хорошее воспроизведение PCO является необходимым для ХКМ, учитывающих кратко- и долговременную изменчивость озонового слоя и её связь с динамическими процессами.

Параметры PCO в расчетах ХКМ SOCOLv3, согласуются с выявленными в спутниковых и наземных наблюдениях (Steiner et al., 2021), что позволяет оценивать изменения PCO в XXI веке в расчетах SOCOLv4, имеющей ту же схему расчета параметров PCO, что и SOCOLv3.

Расчеты ХКМ SOCOLv4 для последних десятилетий показывают небольшой значимый отрицательный тренд озонового слоя в низких широтах в нижней стратосфере, что согласуется в целом с результатами анализа спутниковых наблюдений (Karagodin-Doeyennel et al., 2022).

Анализируемые в настоящей работе расчеты ХКМ SOCOLv4 ранее использовались для исследования эволюции озонового слоя в течение XXI (Karagodin-Doeyennel et al., 2023).

Результаты показали вероятное увеличение содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере и в нижней стратосфере высоких широт. При сценарии SSP5-8.5 увеличение озона сильнее из-за более сильного снижения температуры стратосферы, замедляющего каталитические циклы разрушения озона. По обоим сценариям в нижней тропической стратосфере содержание озо-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

на снижается и увеличивается в средних и высоких широтах обоих полушария из-за усиления меридионального переноса.

В настоящем исследовании анализируются рассчитанные ХКМ SOCOLv4 среднемесячные значения температуры, зонального и меридионального ветра, геопотенциальной высоты, поверхностной плотности (SAD) твердых частиц тригидрата азотной кислоты (NAT) и жидких капель (STS) ПСО I типа, а также изменения концентраций HNO_3 , H_2O и O_3 .

Для анализа межгодовой изменчивости стратосферы Арктики с использованием результатов расчетов ХКМ SOCOLv4 рассчитывался объем воздушных масс с температурой ниже необходимой для формирования ПСО (далее V_{psc}) и объем стратосферного полярного вихря (V_{vortex}) по методике (Lawrence et al., 2018). Ранее таким же образом были получены оценки V_{psc} в расчетах модели ИВМ РАН CM5 для условий современного и будущего климата (Варгин и др., 2020; Vargin et al., 2022).

Используя трехмерные данные температуры, скорости ветра и геопотенциала, вычислялась потенциальная завихренность (PV) на изобарических поверхностях. Далее значения PV и температуры интерполировались на изентропические уровни, где вычислялся положение максимума градиента PV от эквивалентной широты, а соответствующее значение PV обозначало границу вихря. Эти значения осреднялись за январь - март и использовались для определения климатической границы полярного вихря. Температура формирования ПСО NAT (T_{nat}) рассчитывалась на уровнях давления, используя средние вертикальные профили H_2O и HNO_3 в области от 60° с.ш. до 90° с.ш. в течение зимнего сезона. Затем значения T_{nat} интерполировались на уровни потенциальной температуры и использовались для оценки границы области формирования ПСО. На каждом изентропическом уровне ячейка сетки относилась к области ПСО, если она находилась внутри области полярного вихря и внутри температурной изолинии $T = T_{nat}$. Объемы V_{psc} и V_{vortex} рассчитывались в диапазоне высот нижней стратосферы от уровня потенциальной температуры 390 К до 590 К (~ 120 hPa - ~ 30 hPa) по площади ПСО на каждом изентропическом уровне с учетом их толщины, суммируя с соответствующими весами.

Для анализа распространения потоков волновой активности в стратосфере рассчитывались: амплитуды планетарных волн с зональными числами 1-3, зональный меридиональный поток тепла, двумерные векторы Элиассена-Пальма (ЭП) и трехмерные векторы Пламба (Plumb 1985). Векторы Пламба по сравнению с векторами ЭП позволяют лучше оценить особенности динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы и распространения волновой активности (напр., Geçaitè et al., 2021; Wei et al., 2021). Рассчитав дивергенцию векторов ЭП, оценивалось влияние распространения волновой активности на среднезональную циркуляцию стратосферы.

Для дальнейшего исследования динамических процессов оценивались изменения остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ), представляющей собой суперпозицию адвективного и индуцированного волнами вихревого движений. В ос-

нове расчета ОМЦ лежит преобразованный Эйлеров подход (Transformed Eulerian Mean, TEM, (напр., Andrews et al., 1984). Расчет меридиональной и вертикальных компонент ОМЦ (V^* и W^*) в настоящее время широко используется для анализа взаимодействия планетарных волн со средним потоком и оценки переноса долгоживущих примесей в меридиональном направлении. ОМЦ позволит оценить ту часть среднего потока, вклад которой в адиабатическое изменение температуры воздуха не компенсируется дивергенцией индуцированного волной потока тепла (Shepherd, 2007). Расчет ОМЦ осуществлялся по методике (Koval et al., 2021).

Наше исследование сфокусировано на изменениях стратосферы в марте, когда химическое разрушение озонового слоя наибольшее из-за увеличивающегося зенитного угла Солнца и проникновения солнечной радиации в стратосферу Арктики после полярной ночи.

Значимость трендов, выявленных в результатах модельных расчетов, оценивалась с использованием теста Стьюдента с уровнем значимости 95%.

Результаты

Мы изучили некоторые динамические характеристики стратосферного полярного вихря (СПВ), в том числе - объем воздуха внутри него (V_{vortex}), объем воздуха внутри СПВ с температурой ниже порога формирования частиц ПСО NAT (V_{psc}), а также максимальный градиент нормированной потенциальной завихренности ($MPVG$), который связан с величиной динамического барьера, расположенного на границе СПВ. Критическая температура формирования ПСО NAT (T_{nat}) зависит от концентрации в воздухе молекул HNO_3 и H_2O (Hansen, Mauersberger, 1988). Поэтому сначала была исследована эволюцию концентраций этих химических компонентов в стратосфере Арктики (60° с.ш. - 90° с.ш.) в зимний период в течение XXI века.

По сценарию SSP2-4.5 средняя концентрация HNO_3 увеличивается на 1 ppb вблизи своего максимума в нижней стратосфере к концу XXI века. Концентрация водяного пара увеличивается на 0,2 ppb в верхней стратосфере и уменьшается на 0,4 ppb в нижней стратосфере. По сценарию SSP5-8.5 средняя концентрация HNO_3 не изменяется, а концентрация водяного пара увеличивается до 1-1,5 ppb в стратосфере к концу XXI века.

Если рассчитать критическую температуру формирования частиц ПСО NAT с использованием средних концентраций H_2O и HNO_3 за два периода времени, то она увеличивается на 0,5-1,1 К в сценарии SSP5-8.5, а для SSP2-4.5 увеличивается в нижней стратосфере до 0,5 К и уменьшается в средней стратосфере на 0,2 К (рис. 1а).

Увеличение V_{psc} в Арктике к концу XXI века выявлено в марте для всех модельных расчетов и среднего значения по ансамблю (рис. 2б-в). Положительный тренд значим только в сценарии SSP5-8.5.

Максимальное значение V_{psc} в марте за весь анализируемый период в умеренном сценарии составляет ~69 млн км³, при жестком сценарии ~62 млн км³.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Для сравнения, по данным реанализа MERRA-2 (Gelaro et al., 2017), V_{psc} в марте 2011 и 2020 гг., когда разрушение озона в Арктике стратосфере было наибольшим за весь период наблюдений: $\sim 29,3$ и $\sim 37,6$ млн km^3 соответственно. Тем не менее, к концу XXI века общее содержание озона в Арктике увеличится из-за меньшей интенсивности источника разрушения озона из-за продолжающегося сокращения эмиссии ОРС в атмосферу. Предположительно, положительный эффект от уменьшения ОРС на разрушение озона превысит отрицательный эффект от ожидаемого увеличения объема ПСО за счет охлаждения стратосферы.

В табл. 1 представлены климатологические значения абсолютных V_{psc} и V_{vortex} в начале и конце XXI века. Можно сделать вывод, что к концу XXI века в среднем V_{psc} увеличиваются на $\sim 160\%$ и $\sim 320\%$ при умеренном и жестком сценариях. Не выявлено существенных изменений климатологических значений V_{vortex} . Эти выводы согласуются с результатами моделирования будущего климата в рамках проекта CMIP6 (von der Gathen et al., 2021; Варгин и др., 2022).

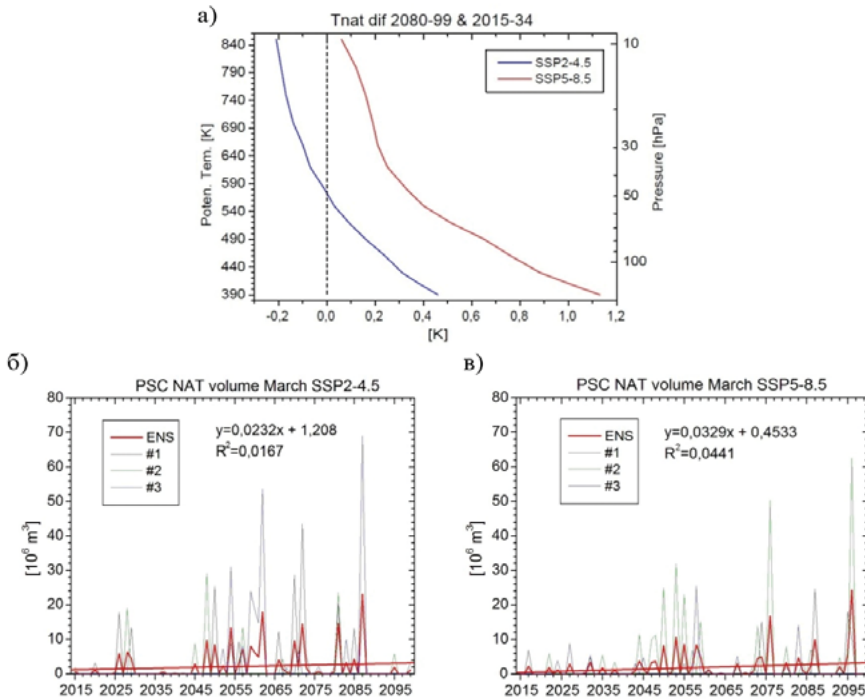


Рис. 1. Различие средних по 3 расчетам вертикальных профилей температуры формирования ПСО NAT (T_{nat}) в области 60° с.ш. - 90° с.ш. между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (а). Изменение «объема» ПСО (V_{psc}) в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б). Красная прямая - линейный тренд, красная кривая - среднее по 3 расчетам значение

Различное поведение V_{vortex} и V_{psc} со временем можно объяснить, если предположить, что градиент PV увеличивается к концу XXI века, но положение его максимума существенно не меняется со временем. Следовательно, площадь

полярного вихря (и объем в нижней стратосфере) также не меняется. Но при этом температура воздуха внутри вихря снижается, что со временем может привести к росту $Vpsc$.

Граница стратосферного полярного вихря зависит от положения максимума меридионального градиента скорости ветра. Анализ модельных данных показал, что максимальное увеличение $MPVG$ наблюдается вблизи изоэнтропического уровня 550 К (~30 гПа / ~23 км) в конце XXI века в январе – феврале до $0,8 - 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$; $1,2 - 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$ (~15% - 20%) при умеренном и в декабре - феврале при жестком сценарии соответственно (рис. 3 а, б).

Табл. 1. Увеличение среднего по 3 членам ансамбля относительного и абсолютного объема ПСО ($Vpsc$) и объема стратосферного полярного вихря ($Vvortex$) в марте между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5

	$Vpsc, 10^6 \text{ km}^3$		$Vvortex, 10^6 \text{ km}^3$	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2015-2034	0,953	0,63	325	345
2080-2099	2,45	2,7	349	358
8099-1534 (%)	~163	~329	~7.4	~3.8

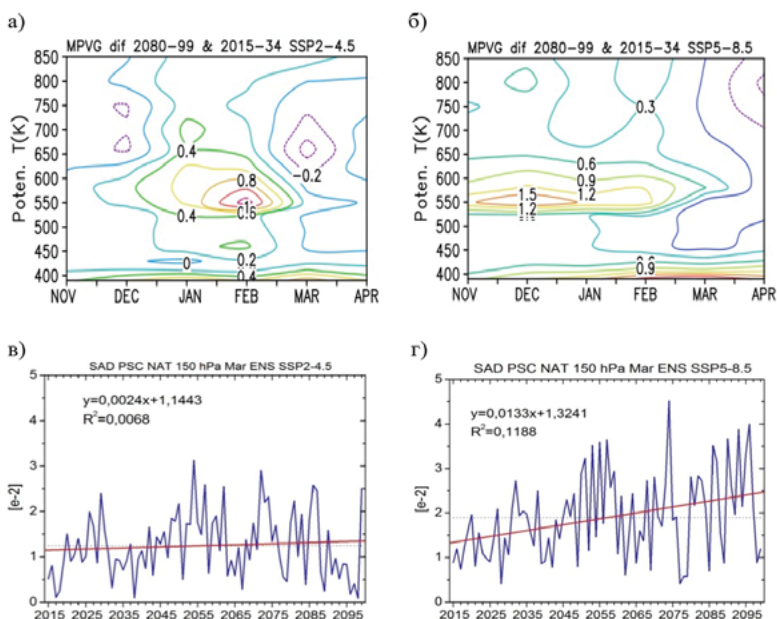


Рис. 2. Различия среднего по 3 расчетам максимального градиента PV ($10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$) с ноября по март между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. для сценариев SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б). Изменение средней по 3 расчетам плотности поверхности (SAD) ПСО NAT в области 60° с.ш.-90° с.ш. на уровне давления 150 гПа в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (в) и SSP5-8.5 (г)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

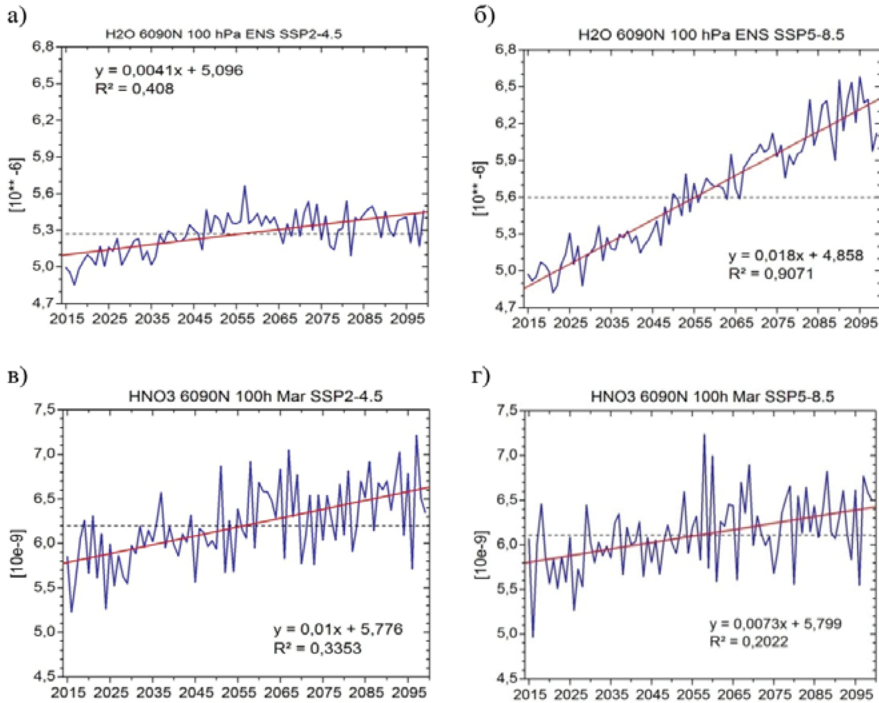


Рис. 3. Среднее по 3 расчетам изменение отношения смеси водяного пара в марте на 100 гПа в области 60°-90° с.ш. с 2015 г. по 2099 г. по сценарию SSP2.4-5 (а) и SSP5.8-5 (б). Аналогично для отношения смеси HNO₃ (в, г). Красная прямая - линейный тренд, пунктирная линия - среднее значение за весь период

Аналогичное усиление *MPVG* было получено при анализе модельных данных INMCM5 (Варгин и др., 2022). Известно, что усиление *MPVG* соответствует уменьшению эффективного коэффициента диффузии на границе полярного вихря и увеличению его изолированности (Kostykin, Schmitz, 2006). Следовательно, охлаждение арктической стратосферы приводит как к увеличению V_{psc} , так и к увеличению изолированности полярного вихря на протяжении всего XXI века.

Для проверки соответствия полученных расчетных оценок объема PCO NAT с параметрами, являющимися прогностическими в модели SOCOLv4, была проанализирована долговременная изменчивость поверхностной плотности (SAD) PCO NAT в нижней полярной стратосфере в XXI веке. Результаты показали, что выявленный положительный тренд SAD PCO NAT в области 60° с.ш. - 90° с.ш. на уровне давления 150 гПа в марте является незначимым в сценарии SSP2.4.5, но значимым в SSP5-8.5 (рис. 2), что согласуется с оценками тенденций рассчитанного V_{psc} (рис. 1б, в).

Увеличение влажности нижней стратосферы Арктики в марте на 10% и 20% ожидается по умеренному и жесткому сценариям (рис. 3 а, б). Большой рост влажности при жестком сценарии, вероятно, обусловлен её усиленным проникновением из тропосферы и формированием при окислении метана CH₄.

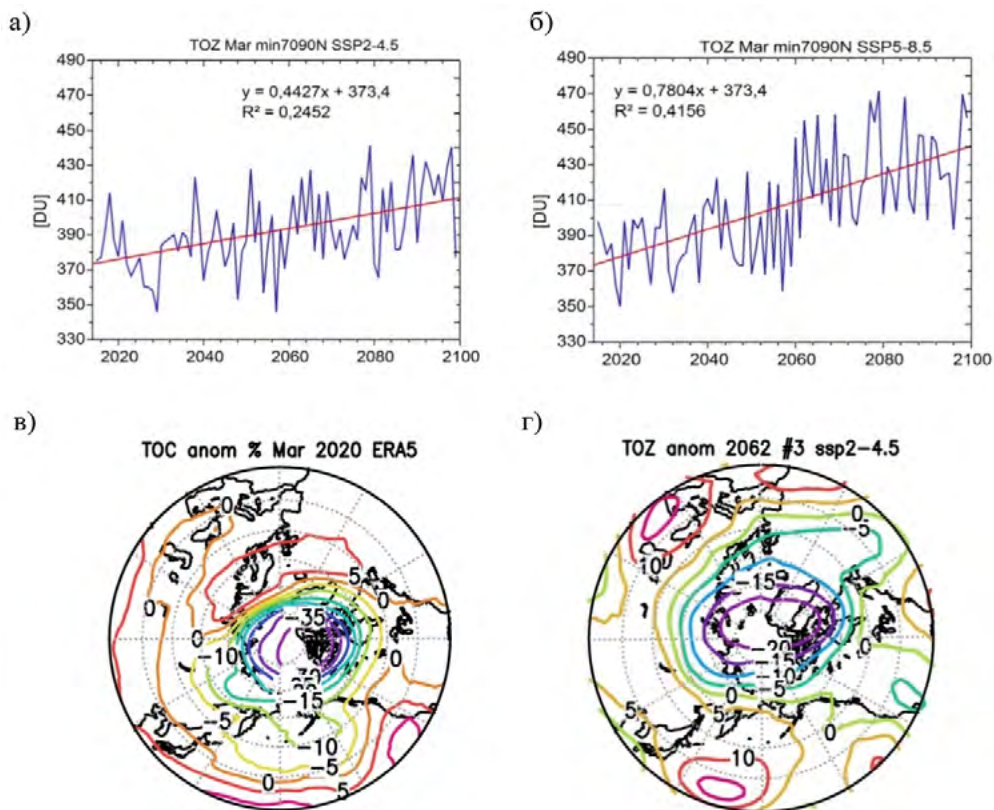


Рис. 4. Изменение средних по 3 расчетам минимальных значений ОСО (е.Д.) в области 70° с.ш. - 90° с.ш. в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (а) и SSP5-8-5 (б). Красная прямая - линейный тренд, пунктирная линия - среднее значение за весь период. Аномалии ОСО (%) в данных наблюдений - март 2020 г. (в) и в модельных расчетах - март 2062 г. (3-й расчет) (г) по сценарию SSP2-4.5

По обоим сценариям выявлен значимый положительный тренд минимальных значений ОСО в марте, что свидетельствует об увеличении содержания озона к концу XXI века в Арктике (рис. 4 а, б). Минимальные среднемесячные значения ОСО в марте 2020 г. составляли 270 е.Д., аномалии до -150 е.Д. (~-35%) (рис. 4в), в то время как в модельных расчетах минимальные значения не опускались ниже 300 е.Д., а аномалии достигали -100 е.Д. (~-20%). В качестве примера представлены аномалии ОСО в марте 2062 г. из 3-го расчета по сценарию SSP2-4.5 (рис. 4г). В модельных расчетах выявлено 8 таких эпизодов с минимальными значениями ОСО в марте. Эти эпизоды характеризуются значениями V_{psc} , значительно превосходящими средние климатические значения, что свидетельствует о формировании аномалий ОСО из-за химического разрушения озона.

Были проанализированы изменения среднезональной температуры, зонального ветра и ОМЦ. Цветовая заливка на рисунке 5 (а, г) иллюстрирует широтно-высотные распределения температуры и зонального ветра из расчетов ХКМ

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

SOCOLv4 в марте, осредненные за 2015-2034 гг. Стрелки на рисунке 5а показывают компоненты ОМЦ, а серые контуры на рисунке 5г - дивергенцию потока ЭП. Приращения соответствующих величин между 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. представлены на центральной (SSP2-4,5) и правой (SSP5-8,5) панелях рисунка 5. При умеренном сценарии SSP2-4,5 прогнозируется похолодание в марте к концу XXI века от ~ 1 К в нижней стратосфере до ~ 3 К в верхней стратосфере и мезосфере (рис. 5б). Как и ожидалось, жесткий сценарий SSP5-8,5 приводит к более сильному снижению температуры от ~ 1 К в нижней стратосфере до ~ 10 К в верхней стратосфере (рис. 5в). При умеренном сценарии изменения температуры в арктической стратосфере сильнее, чем на средних широтах: до ~ 4 К, а при жестком сценарии изменения температуры в арктической стратосфере, наоборот, меньше. В целом наблюдается ожидаемое охлаждение стратосферы и мезосферы и потепление тропосферы (рис. 5б, в), что согласуется с результатами, например, (Steiner et al., 2021), (Butchart, 2022).

Помимо изменений температуры, наблюдается общее усиление компонент ОМЦ. Это видно по стрелкам приращений ОМЦ на рисунке 5б, которые в основном сонаправлены компонентам ОМЦ на рис. 5а. Однако имеются некоторые исключения. Наиболее сильные приращения наблюдаются в верхней стратосфере и мезосфере, а также в верхней тропосфере. Усиление ОМЦ гораздо сильнее при сценарии SSP5-8,5, когда изменения могут достигать 20% (рисунок 5в). Ускорение ОМЦ из-за увеличения выбросов ПГ неоднократно прогнозировалось большинством ХКМ (напр., Butchart et al., 2010). Существенную роль в изменении ОМЦ играет волновая активность: индуцированная волной вихревая составляющая ОМЦ напрямую связана с активностью планетарных волн (ПВ). Расчеты показывают, что ослабление вихревой составляющей ОМЦ вызывает ослабление нисходящей ветви ОМЦ в арктической стратосфере (10 гПа - 1 гПа) (рис. 5б), что, в свою очередь, вероятно, является основной причиной похолодания в этой области к концу XXI века для умеренного сценария. При жестком сценарии ослабление волновой активности наблюдается и в другой области: в нижней стратосфере (100 - 50 гПа) средних широт, где также наблюдается ослабление ОМЦ. Усиление ОМЦ к концу XXI века, особенно при жестком сценарии, существенно влияет на состав средней атмосферы, в частности, способствуя уменьшению возраста воздуха (напр., Waugh, 2009).

Изменения температуры стратосферы и ОМЦ приводят к усилению зонального ветра в высоких широтах нижней и средней стратосфере: до 1-2 м/с при умеренном и до 6 м/с при жестком сценарии (рис. 5д, е). Например, усиление меридиональной компоненты ОМЦ в стратосфере при обоих сценариях за счет силы Кориолиса соответствует ускорению зонального ветра в восточном направлении. Однако при умеренном сценарии вызванное ПВ ослабление вихревой компоненты ОМЦ в арктической стратосфере может также вызвать замедление зонального ветра между 5 и 100 гПа (рис. 5е).

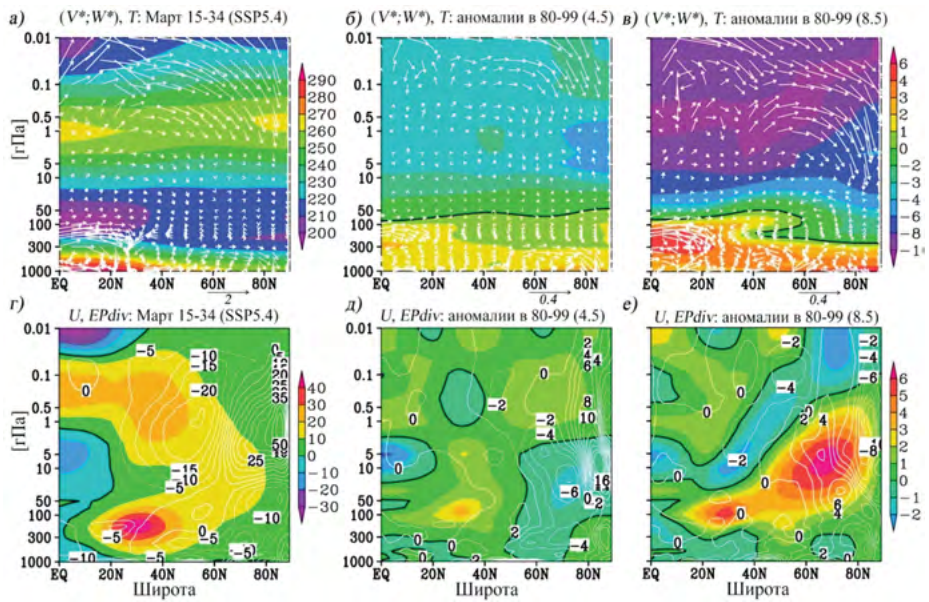


Рис. 5. Широтно-высотное распределение меридиональной V^* и вертикальной W^* компонент ОМЦ (м/с, вертикальная компонента, умноженная на 200) (стрелки) и среднезональной температуры (К) (заливка) в марте 2015-2034 гг. (а) и соответствующие изменения между периодами: 2080-2099 и 2015-2034 гг. в рамках сценариев SSP2-4.5 (б) и SSP5-8.5 (в). Зонально-осредненный зональный ветер (м/с) (заливка) и дивергенция потока ЭП ($\text{м}^2/\text{с}^2/\text{сут}$) (контуры) за март 2015-2034 гг. (г); соответствующие изменения между периодами: 2080–2099 гг. и 2015–2034 гг. в рамках сценариев SSP2-4.5 (д) и SSP5-8.5 (е)

Как уже обсуждалось, кроме роста ПГ изменениям динамики стратосферы может способствовать изменение волновой активности. Для анализа этого была рассчитана дивергенция потока ЭП и ее приращения, показанные серыми контурами на рис. 5д, е. Основной причиной ослабления зонального ветра ниже 3-5 гПа при сценарии SSP2-4.5 является отрицательное приращение дивергенции потока ЭП, что соответствует передаче импульса от среднего потока к ПВ (рис. 5д). Аналогичный процесс наблюдается в стратосфере и мезосфере средних широт при SSP5-8.5 (рис. 5е). В полярной области, наоборот, происходит передача импульса среднему течению (положительное приращение дивергенции потока ЭП). Эта передача способствует ускорению зонального ветра. В обоих сценариях усиление субтропических струйных течений в нижней стратосфере (на ~ 2 м/с и ~ 4 м/с для SSP2-4.5 и SSP5-8.5 сценариев соответственно) объясняется усилением меридиональных градиентов температуры. Также усилению субтропической струи способствует перенос волновой энергии в сторону среднего течения (выраженный в дивергенции потока ЭП).

Связанное с ростом концентраций ПГ охлаждение стратосферы влияет на распространение волновой активности. При умеренном сценарии к концу XXI века в январе-феврале ожидается усиление распространения волновой активно-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

сти, а также амплитуды волны с зональным числом 1 над высокими широтами с максимумом вблизи 5 гПа. При жестком сценарии для волны 1 ожидается небольшое усиление над средними широтами и ослабление над полярными.

Выводы

Полученные с использованием расчетов ХКМ SOCOLv4 результаты сравнения параметров стратосферы для конца и начала XXI века позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Охлаждение стратосферы к концу XXI века из-за роста концентраций парниковых газов ожидается в расчетах по обоим сценариям. При жестком сценарии похолодание стратосферы сильнее. Охлаждение стратосферы и усиление ОМЦ приведут к усилению среднезональной циркуляции на 1-2 м/с при умеренном и до ~6 м/с при сценарии SSP5-8.5.

2. Увеличение V_{psc} в марте ожидается по обоим сценариям (большее при жестком). Усиление меридионального градиента PV, выявленное в стратосфере Арктики в расчетах по обоим сценариям, соответствует уменьшению эффективной диффузии на границе вихря и приводит к усилению изолированности вихря. Эти изменения соответствуют усилению стратосферного полярного вихря к концу XXI века, что согласуется с результатами анализа расчетов более 20 климатических моделей проекта CMIP6, включая 4 ХКМ (von der Gathen et al., 2021) и расчетов климатической модели ИВМ РАН CM5 (Vargin et al., 2022).

3. Из-за формирования благоприятных динамических условий в отдельные зимние сезоны возможно значительное уменьшение озонового слоя в Арктике в марте с аномалиями ОСО до -80 е.Д. (~20%), что сравнимо с аномалиями марта 2011 г., но меньше наблюдавшихся в марте 2020 г. В расчетах SOCOLv4 по обоим сценариям выявлено 8 таких месяцев. Однако, в целом, выявленный по обоим сценариям значимый положительный тренд минимальных значений ОСО в марте свидетельствует об увеличении содержания озона к концу XXI века в Арктике.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы Санкт-Петербургского государственного

Литература

1. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020, т. 56, № 5, С. 1–13. DOI: 10.31857/S0002351520050119.

2. Andersson S., Martinsson B., Vernier J.-P., et al. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere // Nature Commun., 2015, V. 6, 7692, <https://doi.org/10.1038/ncomms8692>.

3. Andrews D. G., McIntyre M. E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen–Palm relation and the mean zonal acceleration // *J. Atmos. Sci.*, 1976, Vol. 33, P. 2031–2048.
4. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., et al. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere // *Meteorol. Monogr.*, 2019, Vol. 59, 27.1–27.61. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-19-0003.1>
5. Ball W., Alsing J., Mortlock D., et al. Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, Vol. 18, P. 1379–1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>.
6. Chipperfield M. Atmospheric science: Nitrous oxide delays ozone recovery // *Nat. Geosci.*, 2009, Vol. 2, P. 742–743, <https://doi.org/10.1038/ngeo678>.
7. Chipperfield M., Bekki S., Dhomse S., et al. Detecting recovery of the stratospheric ozone layer // *Nature*, 2017, Vol. 549, doi:10.1038/nature23681.
8. Fleming E., Newman P., Liang Q., Daniel J. The Impact of Continuing CFC-11 Emissions on Stratospheric Ozone // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2020, Vol. 125, e31849, <https://doi.org/10.1029/2019JD031849>.
9. Friedel M., Chiodo G., Stenke A., Domeisen D., Fueglistaler S., Anet J. Springtime arctic ozone depletion forces northern hemisphere climate anomalies // *Nat. Geosci.*, 2022, Vol. 15, P. 541–547. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00974-7>.
10. Gečaitė I. Climatology of Three-Dimensional Eliassen–PalmWave Activity Fluxes in the Northern Hemisphere Stratosphere from 1981 to 2020 // *Climate*, 2021, Vol. 9, 124. <https://doi.org/10.3390/cli9080124>.
11. Haase S., Matthes K. The importance of interactive chemistry for stratosphere–troposphere coupling // *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, Vol. 19, P. 3417–3432.
12. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-I // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 6623–6645, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6623-2021>
13. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-I // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 6623–6645, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6623-2021>.
14. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. The historical ozone trends simulated with the SOCOLv4 and their comparison with observations and reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.*, 2022, Vol. 22, P. 15333–15350, <https://doi.org/10.5194/acp-22-15333-2022>.
15. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4 // *EGUsphere*, 2023.
16. Keeble J., Hassler B., Banerjee A., et al. Evaluating stratospheric ozone and water vapour changes in CMIP6 models from 1850 to 2100 // *Atmos. Chem. Phys.* 2021, Vol. 21, P. 5015–5061. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5015-2021>.
17. Kostykin S.V., Schmitz G. Effective diffusivity in the middle atmosphere based on general circulation model winds // *J. Geophys. Res.*, 2006, V. 111, D02304.
18. Koval A., Chen W., Didenko K., Ermakova T., Gavrillov N., Pogoreltsev A., et al. Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.*, 2021, Vol. 39, P. 357–368.

19. Lawrence Z., Manney G., Wargan, K. Reanalysis intercomparisons of stratospheric polar processing diagnostics // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, Vol. 18, P. 13547–13579. <https://doi.org/10.5194/acp-18-13547-2018>
20. Oberländer S., Langematz U., Meul S. Unraveling impact factors for future changes in the Brewer-Dobson circulation // *J. Geoph. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, p. 10296–10312. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50775>.
21. Oram D., Ashfold M., Laube J., et al. A growing threat to the ozone layer from short-lived anthropogenic chlorocarbons // *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, Vol. 17, P. 11929–11941, <https://doi.org/10.5194/acp-17-11929-2017>
22. Plumb R. On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves // *J. Atmos. Sci.*, 1985, Vol. 42, P. 217–229.
23. Rieder H., Chiodo G., Fritzer J., et al. Is interactive ozone chemistry important to represent polar cap stratospheric temperature variability in Earth-System Models? // *Environ. Res. Lett.*, 2019, Vol. 14, 044026 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab07ff>
24. Shepherd T. G. Transport in the middle atmosphere // *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2007, Vol. 85B, P. 165—191.
25. Steiner M., Luo B., Peter T., et al. Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry–climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 935–959.
26. Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., et al. Atmosphere–ocean–aerosol–chemistry–climate model SOCOLv4.0: description and evaluation // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 5525–5560. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5525-2021>
27. Vargin, P.N., Kostykin, S.V., Volodin, E.M., Pogoreltsev, A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // *Atmosphere*, 2022, Vol. 13 (1), 25 <https://doi.org/10.3390/atmos13010025>
28. von der Gathen P., Kivi R., Wohltmann I., et al. Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone // *Nature Commun.*, 2021, Vol. 12, P. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24089-6>.
29. Wang W., Tian W., Dhomse S., et al. Stratospheric ozone depletion from future nitrous oxide increases // *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 14, P. 12967–12982.
30. Wei K., Ma J., Chen W., Vargin P. Longitudinal peculiarities of planetary waves-zonal flow interactions and their role in stratosphere-troposphere dynamical coupling // *Clim. Dyn.*, 2021, Vol. 57, P. 2843–2862. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05842-5>.
31. WMO. Executive Summary of Scientific Assessment of Ozone Depletion. 2022. WMO: Geneva, Switzerland. 2022.
32. Zhang J., Tian W., Xie F., et al. Stratospheric ozone loss over the Eurasian continent induced by the polar vortex shift // *Nature Commun.*, 2018, Vol. 9, 206. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02565-2>.
33. Zubov V., Rozanov E., Egorova T., et al. Role of external factors in the evolution of the ozone layer and stratospheric circulation in 21st century // *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, Vol. 13, P. 4697–4706, <https://doi.org/10.5194/acp-13-4697-2013>.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОТОКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ СМIP6 И ИХ ВКЛАД В ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В 21 ВЕКЕ

С.Н. Денисов^{1*}, А.В. Елисеев^{1,2,3}, И.И. Мохов^{1,2,4}

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., Москва*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

³*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

⁴*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

**denisov@ifaran.ru*

Аннотация. Для оценки способности современных глобальных моделей Земной системы учитывать природный обмен углерода проанализированы данные ансамбля моделей проекта СМIP6 для 21 века. Получены оценки влияния природных и антропогенных потоков углекислого газа и метана с территории России, Китая, Канады и США на возможные изменения глобальной приповерхностной температуры атмосферы в 21 веке при различных сценариях антропогенного воздействия с использованием кумулятивного температурного потенциала. Показано, что изменение климатических условий при различных сценариях антропогенных воздействий может сильно влиять на показатели климатического вклада потоков парниковых газов, особенно на больших временных горизонтах.

Ключевые слова: моделирование климата, потоки парниковых газов, углекислый газ, метан, температурный потенциал

Введение

Концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась в полтора раза с начала индустриальной эпохи – от уровня около 280 ppm до уровня около 420 ppm к 2023 году. С середины 20 века доминирующим фактором ее роста стали антропогенные выбросы в атмосферу, связанные с использованием ископаемого топлива, и их относительная доля продолжает расти вплоть до настоящего времени. Антропогенные выбросы происходят на фоне природного углеродного обмена, в котором углерод циркулирует между резервуарами атмосферы, океана, биосферы и почвы в масштабах от внутрисуточных до тысячелетних и более (Archer, 2009). Значительный диапазон неопределенности современных оценок возможной концентрации CO₂ в конце 21 века связан с изменчивостью природного углеродного обмена и неопределенностью в обратной связи углеродный

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

цикл-климат (Friedlingstein, 2014). Особенно актуальны оценки изменений углеродного цикла и их влияния на климат в связи с Парижским соглашением (2015) Рамочной конвенции ООН об изменении климата, касающимся проблем сокращения выбросов парниковых газов и связанной с этим адаптации на национальном уровне (Мохов, 2022).

В данной работе представлены количественные оценки антропогенных и естественных потоков углекислого газа и метана для наземных экосистем России, Китая, Канады и США в 21 веке при разных сценариях антропогенных воздействий и их вклада в глобальное потепление с использованием результатов расчетов с ансамблем моделей земной системы.

Используемые данные и методы анализа

В представленной работе анализ естественных потоков CO_2 и CH_4 в атмосфере с территории России, Китая, Канады и США в 21 веке проводился с использованием результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей международного проекта CMIP6 (Eyring, 2016). Использовались результаты модельных расчетов для периода 1990-2100 гг. при сценариях антропогенного воздействия семейства SSP в 21 веке (Riahi, 2017), а именно SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5. В таблицах 1а и 1б представлена информация об использованных моделях.

Табл. 1а. Информация о модельных расчетах, использовавшихся при анализе потоков CO_2

Модель	Институт	Наземный блок	Число вариантов
ACCESS-ESM1-5	CSIRO, Австралия	CABLE 2.4	160
BCC-CSM2-MR	BCC, Китай	BCC-AVIM2	4
CanESM5	CCCma, Канада	CLASS 3.6/CTEM 1.2	200
CESM2 CESM2-WACCM	NCAR, США	CLM 5	12
			8
CMCC-ESM2 CMCC-CM2-SR5	CMCC, Италия	CLM 4.5	4
			4
CNRM-ESM2-1	CNRM, Франция	Surfex 8.0c	25
EC-Earth3-Veg EC-Earth3-Veg-LR EC-Earth3-CC	Ec-Earth-Consortium	LPJ-GUESS	26
			12
			2
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL, США	GFDL-LM4.1	1

Окончание таблицы 1а

Модель	Институт	Наземный блок	Число вариантов
IPSL-CM5A-INCA	IPSL, Франция	ORCHIDEE	2
IPSL-CM6A-LR			34
MPI-ESM1-2-LR	MPI-M, Германия	JSBACH 3.20	40
MRI-ESM2-0	MRI, Япония	HAL 1.0	1
NorESM2-LM	NCC, Норвегия	CLM	6
NorESM2-MM			5
TaiESM1	AS-RCEC, Тайвань	CLM 4.0	4

Для большинства моделей доступно множество вариантов расчетов при различных начальных условиях. Некоторые модели также представлены в нескольких версиях, различия между которыми связаны с различным пространственным разрешением (для NorESM2 и EC-Earth3) или включением блока атмосферной химии (CESM2, CMCC).

Табл. 16. Информация о модельных расчетах, использовавшихся при анализе потоков CH_4

Модель	Институт	Наземный блок	Число вариантов
CESM2	NCAR, США	CLM 5	12
CESM2-WACCM			8
NorESM2-LM	NCC, Норвегия	CLM	6
NorESM2-MM			5
UKESM1-0-LL	МОНС, Великобритания	JULES-ES-1.0	42

В данной работе для определения естественных потоков CO_2 и CH_4 анализировались, соответственно, переменные “NEP” (net ecosystem production) и “wetland CH_4 ”. При этом данные NEP для моделей CESM2, CESM2-WACCM и IPSL-CM5A-INCA аналогично (Денисов, 2024) при анализе в данной работе использовались с обратным знаком.

В представленной работе анализировались среднеансамблевые значения потоков парниковых газов. Различные версии одной модели при осреднении группировались, поскольку показывают близкие результаты расчетов естественных потоков парниковых газов. Таким образом из 19 моделей для CO_2 и 5 моделей для CH_4 было образовано, соответственно 14 и 3 группы (см. табл. 1а и 1б). Далее для каждого сценария антропогенных воздействий для каждой группы моделей были рассчитаны средние значения потоков CO_2 и CH_4 по всем доступным модельным вариантам. И уже средние значения потоков между группами рассматриваются как среднеансамблевые.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Вклад естественных и антропогенных потоков CO_2 и CH_4 в атмосферу в глобальные изменения климата оценивался с помощью кумулятивного температурного потенциала (СТ) аналогично (Денисов, 2019, 2022, 2024). Он показывает возможное суммарное воздействие источника парниковых газов на некотором временном горизонте на глобальную приповерхностную температуру атмосферы. При расчете СТ используется потенциал изменения глобальной температуры (GTP), модифицированный с учетом изменения фоновых условий. Подробное описание модификации GTP и ее эффектов приведено в (Денисов, 2022).

Потоки парниковых газов

На рис. 1 показаны среднеансамблевые значения естественных потоков CO_2 и CH_4 для территории России при различных сценариях антропогенных воздействий. Отрицательные значения на графиках для CO_2 соответствуют поглощению углекислого газа из атмосферы. В связи с высокой изменчивостью потоков результаты расчетов естественных потоков на этом и следующих рисунках представлены с 9-летним скользящим осреднением.

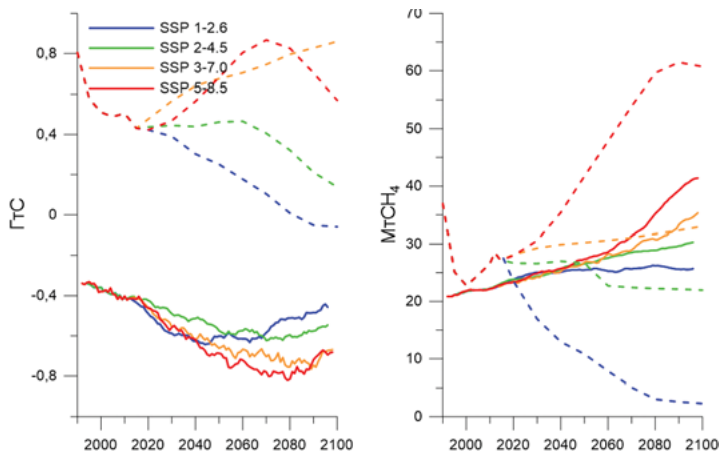


Рис. 1. Антропогенные (пунктирные линии) и естественные (сплошные линии) потоки CO_2 (слева) и CH_4 (справа) на территории России при различных сценариях антропогенных воздействий

В среднем по ансамблю современные значения поглощения CO_2 наземными экосистемами России составляют около 0.4 ГтС/год. Это соответствует диапазону современных оценок 0.2-0.8 ГтС/год (Dolman, 2012; Денисов, 2022). Далее в течение 21 века поглощение CO_2 наземными экосистемами растет до 0.6-0.8 ГтС/год в зависимости от сценария, а к концу 21 века отмечается тенденция к снижению поглощения CO_2 при всех сценариях, причем, чем сильнее антропогенные воздействия на климат, тем позже достигается максимум поглощения CO_2 и начинается его сокращение. Антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу с территории России сопоставимы с естественными потоками из атмосферы и могут в значительной мере компенсироваться ими, особенно при сценариях SSP 1-2.6 и 2-4.5.

Потоки метана из наземных экосистем России сопоставимы с антропогенными и составляют около 22 Мт/год в начале 21 века по расчетам с ансамблем моделей СМIP6. На протяжении всего 21 века они растут и достигают 25-40 Мт/год, превосходя к концу века соответствующие антропогенные эмиссии при всех сценариях антропогенных воздействий кроме SSP 5-8.5.

Нужно отметить, что стандартное отклонение оценок поглощения CO_2 по ансамблю моделей сопоставимо с самими значениями среднего поглощения, а для CH_4 оно составляет около 30% от среднего значения эмиссий. При этом такие высокие значения расхождений в модельных оценках характерны для всех стран.

На рис. 2 представлены аналогичные графики изменений естественных и антропогенных потоков CO_2 и CH_4 для территории Китая. В среднем по ансамблю поглощение CO_2 наземными экосистемами Китая в начале 21 века составляет около 0.3 ГтС/год, что соответствует диапазону оценок 0.17-0.35 ГтС/год (Piao, 2009; Tian, 2011; Денисов, 2022). В течение 21 века поглощение CO_2 наземными экосистемами растет до 0.4-0.7 ГтС/год в зависимости от сценария. Некоторое снижение поглощения CO_2 к концу 21 века отмечается только при сценарии SSP 1-2.6, при других сценариях к концу 21 века наблюдается только замедление его роста. Антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу с территории Китая значительно превышают естественные потоки из атмосферы на всем протяжении 21 века и сравниваются только в самом его конце при сценариях SSP 1-2.6 и 2-4.5.

Современные потоки метана из наземных экосистем Китая составляют около 20 Мт/год и в первой половине 21 века в несколько раз уступают антропогенным. На протяжении 21 века они возрастают до 22-36 Мт/год и сравниваются с антропогенными эмиссиями при всех сценариях антропогенных воздействий кроме SSP 3-7.0.

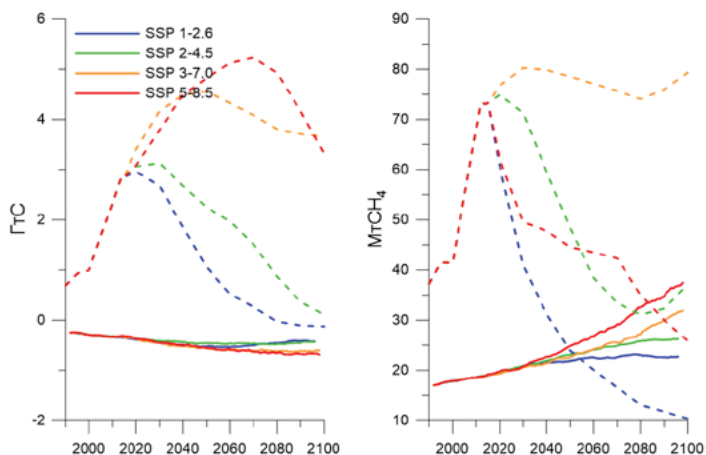


Рис. 2. Антропогенные (пунктирные линии) и естественные (сплошные линии) потоки CO_2 (слева) и CH_4 (справа) на территории Китая при различных сценариях антропогенных воздействий

На рис. 3 представлены аналогичные графики изменений естественных и антропогенных потоков CO_2 и CH_4 для территории Канады. Современное поглощение CO_2 из атмосферы наземными экосистемами Канады в среднем по ансамблю составляет 0.2-0.25 ГтС/год, что соответствует диапазону оценок 0.04-0.24 ГтС/

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

год (Hayes, 2012; Денисов, 2022). В течение 21 века поглощение CO_2 наземными экосистемами растёт до 0.35-0.5 ГтС/год в зависимости от сценария. Как и для России отмечается тенденция достижения максимума поглощения углекислого газа и дальнейшее его снижение к концу 21 века. При этом, в отличие от других стран, в конце исторического сценария (в начале 21 века) происходит подобная смена роста поглощения CO_2 его сокращением. Антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу с территории Канады полностью компенсируются естественными потоками из атмосферы даже при сценарии наиболее сильных антропогенных воздействий на климат SSP 5-8.5.

Современные потоки метана из наземных экосистем Канады составляют в среднем по ансамблю моделей около 15 Мт/год. На протяжении 21 века они возрастают до 17-25 Мт/год в зависимости от сценария антропогенных воздействий. В отличие от других рассматриваемых стран, естественные потоки метана для Канады более чем вдвое превосходят антропогенные на протяжении всего 21 века.

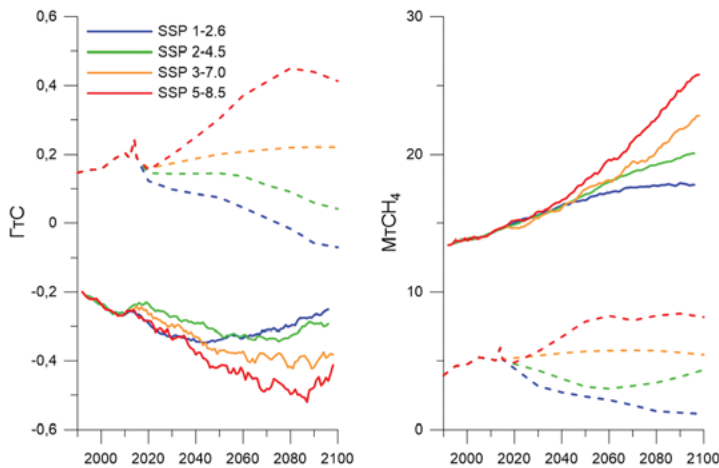


Рис. 3. Антропогенные (пунктирные линии) и естественные (сплошные линии) потоки CO_2 (слева) и CH_4 (справа) на территории Канады при различных сценариях антропогенных воздействий

На рис. 4 представлены аналогичные графики изменений естественных и антропогенных потоков CO_2 и CH_4 для территории США. Современное поглощение CO_2 из атмосферы наземными экосистемами США в среднем по ансамблю составляет около 0.45 ГтС/год. Это соответствует современным оценкам 0.14-0.69 ГтС/год (Hayes, 2012; Rasala, 2001; Xiao, 2011; Денисов, 2022). В течение 21 века поглощение CO_2 наземными экосистемами США меняется мало и при всех сценариях кроме SSP 5-8.5 остается в диапазоне 0.4-0.5 ГтС/год. Для сценария SSP 5-8.5 отмечается рост поглощения до 0.6 ГтС/год и возвращение в этот диапазон. Как и для Китая антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу значительно превышают естественные потоки из атмосферы на всем протяжении 21 века и сравниваются только в самом его конце при сценариях SSP 1-2.6 и 2-4.5.

Современные потоки метана из наземных экосистем США минимальны среди рассмотренных стран и составляют в среднем по ансамблю моделей около 10 Мт/год. На протяжении 21 века они возрастают до 12-19 Мт/год в зависимо-

сти от сценария антропогенных воздействий. Антропогенные потоки метана в начале 21 века втрое превышают естественные, а к концу века снижаются до сопоставимых значений только при сценариях SSP 1-2.6 и 2-4.5.

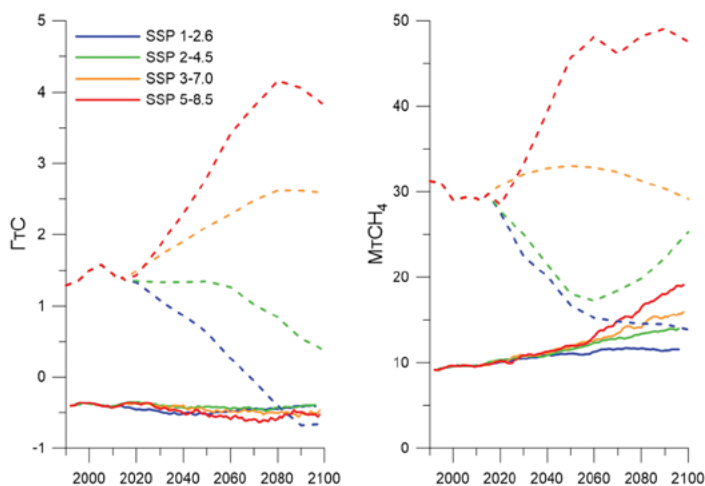


Рис. 4. Антропогенные (пунктирные линии) и естественные (сплошные линии) потоки CO₂ (слева) и CH₄ (справа) на территории США при различных сценариях антропогенных воздействий

Кумулятивный температурный потенциал

На рис. 5 приведены значения кумулятивного температурного потенциала естественных и антропогенных потоков парниковых газов для территории России при различных сценариях антропогенных воздействий. Замедляющий потепление эффект поглощения CO₂ наземными экосистемами (50-110 мК к концу 21 века) в значительной мере компенсируется ускоряющими потепление естественными эмиссиями метана (40-60 мК). Суммарный эффект наиболее велик при сценарии SSP 1-2.6 и составляет около -40 мК, а при сценарии SSP 5-8.5 к концу 21 века вклад наземных экосистем России в изменения климата становится близок к нулю.

Эффекты антропогенных выбросов CO₂ и метана для России близки в 21 веке при всех сценариях, кроме SSP 1-2.6. К концу 21 века возможный эффект от антропогенных эмиссий CO₂ составляет 50-70 мК, а CH₄ – 20-80 мК в зависимости от сценария. Суммарное антропогенное воздействие России оценивается в 70-150 мК. При всех сценариях кроме SSP 1-2.6 в 21 веке продолжается рост суммарного антропогенного вклада в потепление. Нужно отметить, что с учетом суммарного естественного вклада, общий вклад России в потепление с 1990 года перестает расти в 21 веке и не превышает 110 мК при всех сценариях, кроме SSP 5-8.5.

На рисунке достаточно хорошо проявляется эффект модификации GTP для учета фоновых условий: хотя, как можно заметить из рис.1, при сценарии SSP 5-8.5 наземные экосистемы поглощают больше углерода, чем при других сценариях, вклад в замедление потепления оказывается ниже. Это происходит из-за того, что при более высоких концентрациях CO₂ в атмосфере удельный эффект на единицу поглощенного или выброшенного CO₂ снижается.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

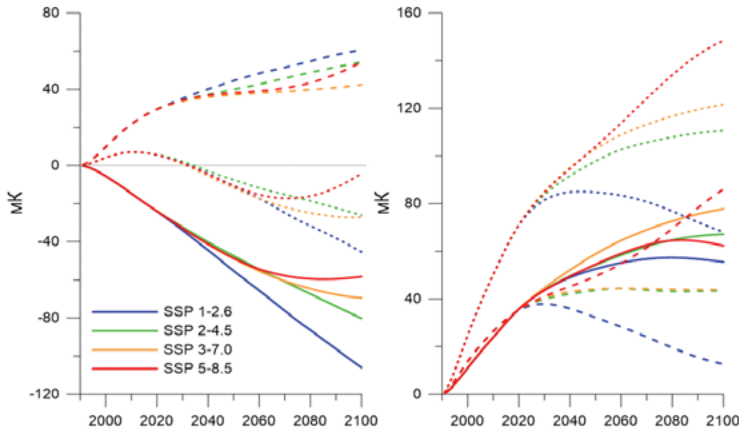


Рис. 5. Кумулятивный температурный потенциал естественных (слева) и антропогенных (справа) потоков CO_2 (сплошные линии) и CH_4 (пунктир), а также их суммарное воздействие (мелкий пунктир) на территории России при различных сценариях антропогенных воздействий

На рис. 6 приведены значения кумулятивного температурного потенциала естественных и антропогенных потоков парниковых газов для территории Китая при различных сценариях антропогенных воздействий. Эффекты естественных потоков парниковых газов очень близки к Российским, хотя и несколько меньше по величине. Замедляющий потепление эффект поглощения CO_2 наземными экосистемами (45-90 мК к концу 21 века) для Китая тоже в значительной мере компенсируется ускоряющими потепление естественными эмиссиями метана (30-50 мК) с практически таким же суммарным эффектом. Стоит отметить, что в случае Китая при сценарии антропогенных воздействий SSP 5-8.5 суммарный эффект естественных потоков парниковых газов к концу 21 века начинает ускорять потепление.

Эффект антропогенных выбросов CO_2 (220-400 мК к концу века) для Китая в 21 веке значительно выше, чем эффект антропогенных выбросов метана (50-100 мК) при всех сценариях. Суммарное антропогенное воздействие Китая оценивается в 270-500 мК. При всех сценариях в 21 веке для Китая прекращается рост суммарного антропогенного вклада в потепление, но он очень велик, по сравнению с эффектами естественных потоков парниковых газов.

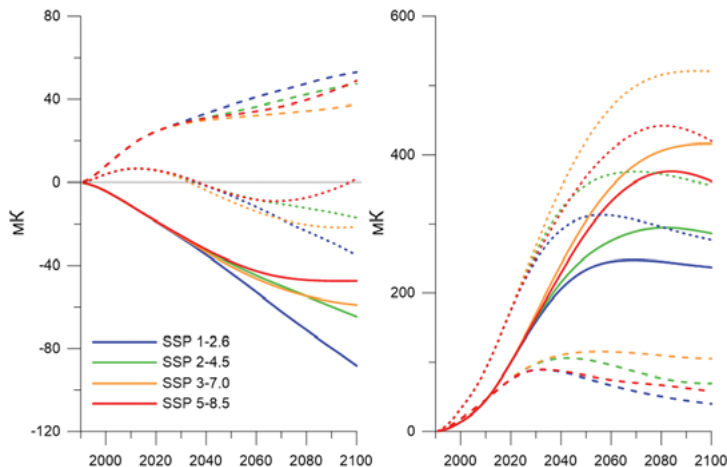


Рис. 6. Кумулятивный температурный потенциал естественных (слева) и антропогенных (справа) потоков CO_2 (сплошные линии) и CH_4 (пунктир), а также их суммарное воздействие (мелкий пунктир) на территории Китая при различных сценариях антропогенных воздействий

На рис. 7 приведены значения кумулятивного температурного потенциала естественных и антропогенных потоков парниковых газов для территории Канады при различных сценариях антропогенных воздействий. Графики для естественных потоков парниковых газов близки к Российским и Китайским, но эффекты еще меньше по модулю. Замедляющий потепление эффект поглощения CO₂ наземными экосистемами составляет 30-60 мК к концу 21 века, а естественные эмиссии метана ускоряют потепление на 25-40 мК. Суммарный эффект естественных потоков парниковых газов не превышает по модулю к концу 21 века 20 мК.

Эффект антропогенных выбросов CO₂ (15-30 мК к концу века) для Канады в 21 веке несколько выше, чем эффект антропогенных выбросов метана (5-12 мК). Суммарное антропогенное воздействие Канады значительно ниже, чем у других рассматриваемых стран и составляет 17-40 мК. При всех сценариях кроме SSP 1-2.6 в 21 веке продолжается рост суммарного антропогенного вклада в потепление. Однако он в значительной мере компенсируется природными потоками, а при сценарии SSP 1-2.6 к концу 21 века общий вклад Канады уже способствует замедлению потепления, чего другие рассматриваемые страны не достигают.

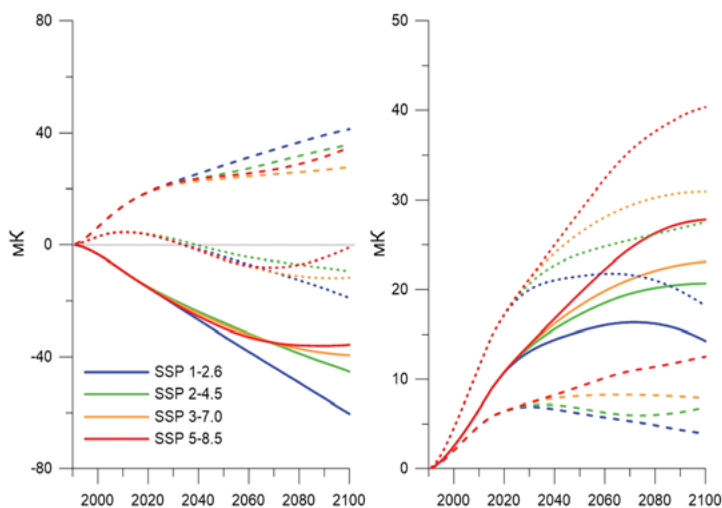


Рис. 7. Кумулятивный температурный потенциал естественных (слева) и антропогенных (справа) потоков CO₂ (сплошные линии) и CH₄ (пунктир), а также их суммарное воздействие (мелкий пунктир) на территории Канады при различных сценариях антропогенных воздействий

На рис. 8 приведены значения кумулятивного температурного потенциала естественных и антропогенных потоков парниковых газов для территории США при различных сценариях антропогенных воздействий. По результатам расчетов с ансамблем климатических моделей для наземных экосистем США характерны высокие значения поглощения CO₂ и минимальные значения эмиссий метана, поэтому заметно отличаются от других стран значения суммарного эффекта естественных потоков парниковых газов. Замедляющий потепление эффект поглощения CO₂ наземными экосистемами составляет 45-90 мК к концу 21 века, а естественные эмиссии метана ускоряют потепление на 15-25 мК.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Суммарный эффект естественных потоков парниковых газов составляет к концу 21 века 20-50 мК.

Эффект антропогенных выбросов CO_2 (110-250 мК к концу века) для США, как и для Китая, в 21 веке значительно выше, чем эффект антропогенных выбросов метана (30-70 мК) при всех сценариях. Суммарное антропогенное воздействие США оценивается в 140-320 мК. При всех сценариях кроме SSP 1-2.6 суммарный антропогенный вклад США в потепление в 21 веке продолжает расти. С учетом эффектов естественных потоков парниковых газов общий вклад США в потепление в 21 веке стабилизируется при всех сценариях антропогенных воздействий.

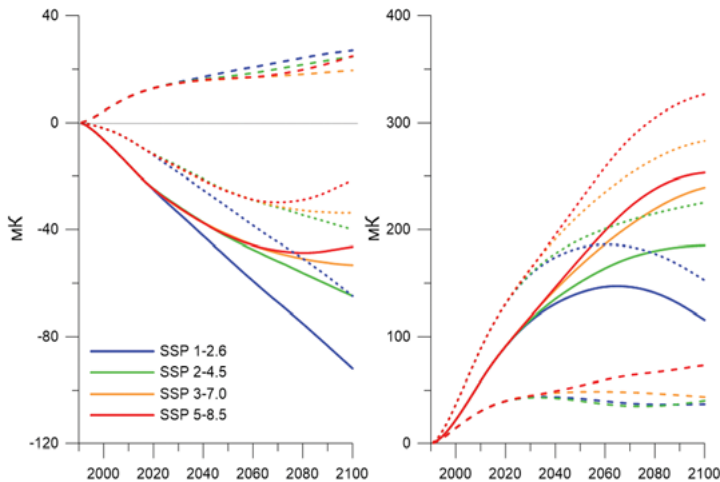


Рис. 8. Кумулятивный температурный потенциал естественных (слева) и антропогенных (справа) потоков CO_2 (сплошные линии) и CH_4 (пунктир), а также их суммарное воздействие (мелкий пунктир) на территории США при различных сценариях антропогенных воздействий

Заключение

Представлены модельные оценки влияния природных и антропогенных потоков углекислого газа и метана с территории России, Китая, Канады и США на возможные изменения глобальной приповерхностной температуры атмосферы в 21 веке при различных сценариях антропогенного воздействия с использованием кумулятивного температурного потенциала. Показано, что изменение климатических условий при различных сценариях антропогенных воздействий может сильно влиять на показатели климатического вклада потоков парниковых газов, особенно на больших временных горизонтах.

Природные эмиссии метана возрастают в 21 веке для всех стран при всех сценариях антропогенных воздействий и могут увеличиться более чем вдвое. Поглощение CO_2 наземными экосистемами для всех стран кроме США при всех сценариях имеет тенденцию достигать максимума в течение 21 века и сокращаться к его концу. Общий вклад в потепление с учетом эффектов естественных и антропогенных потоков парниковых газов стабилизируется в 21 веке для всех стран при всех сценариях кроме SSP 5-8.5.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 24-17-00211, с использованием результатов, полученных в рамках проекта 23-47-00104, а также в соответствии с соглашением № 075-15-2021-577 Минобрнауки России с ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Литература

1. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. Т. 488. № 1. С. 74-80.
2. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18-32.
3. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Естественные стоки и источники CO_2 и CH_4 в атмосфере Российских регионов и их вклад в изменения климата в 21 веке по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. (в печати)
4. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3-14.
5. Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., and Tokos K. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide // Annu. Rev. Earth Pl. Sci. 2009. V. 37. P. 117–134. doi:10.1146/annurev.earth.031208.100206
6. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M. K., Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., and Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosci. 2012. V. 9. P. 5323–5340.
7. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., and Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
8. Friedlingstein P., Meinshausen M., Arora V.K., Jones C.D., Anav A., Liddicoat S.K., and Knutti R. Uncertainties in CMIP5 Climate Projections due to Carbon Cycle Feedbacks // Journal of Climate. 2014. V. 27. № 2. P. 511–526. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>
9. Hayes D.J., Turner D.P., Stinson G., et al. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory - based data // Glob. Change Biol. 2012. V. 18. №. 4. P. 1282-1299.
10. Pacala S.W., Hurtt G.C., Baker D., et al. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates // Science. 2001. V. 292. №. 5525. P. 2316-2320.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

11. Piao S., Fang J., Ciais P., et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // *Nature*. 2009. V. 458. P. 1009–1013.

12. Riahi K., van Vuuren D.P., Kriegler E., et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environ. Change*. 2017. V. 42. P. 153–168.

13. Tian H., Xu X., Lu C., et al. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming // *J Geophys. Res.-Biogeosci.* 2011. V. 116. G02011.

14. Xiao J., Zhuang Q., Law B.E., et al. Assessing net ecosystem carbon exchange of US terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations // *Agricult. Forest Meteorol.* 2011. V. 151. №. 1. P. 60-69.



3

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ
ПОСЛЕДСТВИЯ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ,
РИСКИ И ВОЗМОЖНОСТИ**

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И УГРОЗЫ ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ

А.Н. Гельфан^{1,2*}, Н.Л. Фролова¹, В.Ю. Григорьев¹, А.С. Калугин²,
М.Б. Киреева¹, Е.Д. Корнилова², И.Н. Крыленко^{1,2}, Д.В. Магрицкий¹,
Ю.Г. Мотовилов², А.А. Сазонов^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Институт водных проблем РАН

**hydrowpi@mail.ru*

Аннотация. В статье обобщены результаты анализа происходящих и оценки будущих изменений факторов водной безопасности, в наибольшей степени подверженных климатическим рискам – показателя обеспеченности водными ресурсами (нормы годового речного стока) и показателя опасности наводнений (нормы максимального речного стока) на всей территории Российской Федерации. Анализ данных наблюдений включает оценки периодов нарушения стационарности в рядах годового и максимального стока, изменений средних и дисперсий за выбранные периоды времени, анализ трендов. Оценки будущих изменений речного стока до конца 21 века выполнены на базе численных экспериментов с гидрологическими моделями с использованием ансамблей расчетных данных глобальных моделей климата. Результаты показывают, что происходящие и будущие изменения речного стока оцениваются с разной степенью значимости, однако для ряда регионов страны уже сейчас требуется адаптация водохозяйственных мероприятий по обеспечению водной безопасности к изменению климата.

Ключевые слова: водная безопасность, речной сток, изменение климата.

Введение

«Водная безопасность» – концепция, которая признана мировым сообществом одним из императивов глобального развития, а угрозы водной безопасности – одним из ключевых факторов глобального риска. Обеспечение водной безопасности включает гарантированный доступ населения к достаточному количеству воды приемлемого качества, защиту людей и объектов инфраструктуры от наводнений, охрану водных объектов от загрязнения и сохранение экосистем (UNESCO-IHP, 2012).

Степень воздействия изменений климата на водную безопасность в конкретном регионе мира зависит от природных факторов, отражающих особенности регионального отклика гидрологических систем на эти изменения, а также от специфических *социально-экономических* и институциональных факторов. Среди разнообразия рисков, которые обусловлены изменением климата и могут создавать угрозы водной безопасности (рис. 1), с наибольшей вероятностью и определенностью оцениваются в последнем докладе IPCC (IPCC, 2023) угрозы обострения физического водного дефицита вследствие уменьшения возобновляемых водных ресурсов, а также рост масштаба и повторяемости наводнений.



Рис. 1. Природные изменения гидрологических систем и связанные с ними угрозы водной безопасности, вызванные изменением климата

Обе глобальные угрозы водной безопасности – водный дефицит и опасные наводнения – входят в число наиболее острых для значительной части населения России, наряду с высоким уровнем загрязнения природных вод, низким качеством питьевой воды и ограниченным доступом к централизованным системам водоснабжения и канализации (Данилов-Данильян, Гельфан, 2015). При этом, если изменения водных ресурсов и характера наводнений могут служить естественными индикаторами климатических изменений, то другие перечисленные угрозы водной безопасности зависят, в большей степени, от социально-экономических факторов, на фоне которых вклад климатического сигнала выделяется с большой неопределенностью. В этой связи мы ограничили предмет нашего исследования анализом изменений возобновляемых водных ресурсов и масштаба наводнений как основных климатообусловленных факторов водной безопасности в Российской Федерации. Кроме того, мы рассматриваем лишь одну составляющую возобновляемых водных ресурсов – поверхностные воды. Мы исклю-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

чили из рассмотрения ресурсы подземных вод, поскольку, во-первых, их уязвимость к изменению климата существенно ниже, чем ресурсов поверхностных вод, и оценивается с еще большей неопределенностью (IPCC, 2023) и, во-вторых, водоснабжение населения страны, особенно крупных городов, и отраслей ее экономики основано, главным образом, на использовании поверхностных вод (Подземный сток..., 2012). Таким образом, далее под возобновляемыми водными ресурсами понимаются ресурсы поверхностных вод.

Общепринятым показателем обеспеченности территории водными ресурсами служит норма годового речного стока, а показателем опасности наводнений – норма максимального речного стока.

Мероприятия по смягчению водного дефицита и управлению риском наводнений традиционно опираются в своей методической основе на гипотезу о стационарности гидрологических процессов – гипотезу, которая в условиях изменения климата может нарушаться и нуждается в дополнительном обосновании для конкретного региона страны. Важную роль при этом играет надежность информации о направленности и значимости наблюдаемых изменений стока рек России и будущих трансформаций их водного режима. Современные данные содержатся в Третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Третий оценочный доклад..., 2022). Структура доклада (как и оценочных докладов IPCC) такова, что вопросам влияния происходящих и особенно будущих изменений речного стока отведена лишь очень малая часть этого фундаментального труда. Настоящей статьей мы стремились расширить данные наших коллег из Росгидромета. В ней обобщены результаты, которые получены двумя научными коллективами – кафедрой гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова и отделом гидрологии речных бассейнов ИВП РАН – в области анализа наблюдаемых и моделирования будущих изменений речного стока соответственно.

Материалы и методы

Анализ изменений речного стока за период наблюдений

Для анализа изменений характеристик речного стока использовались данные о расходах воды в гидрометрических створах рек России, содержащиеся в гидрологических ежегодниках и кадастровых справочных изданиях региональных управлений Росгидромета. Из имеющихся данных были отобраны ряды наблюдений с продолжительностью 55 и более лет и с отсутствием или минимальным количеством пропусков в наблюдениях. Кроме того, не использовались данные по створам, выше которых имеются водохранилища сезонного или многолетнего регулирования, или осуществляются значительные водозаборы, чтобы исключить влияние антропогенной деятельности на водный режим. В результате был получен архив, который содержит данные по годовому стоку для 698 постов с 1950 по 2019 гг., в том числе для европейской территории России (ЕТР) использовались данные по 361 посту, а для азиатской части России (АТР) – по 337

постам. По максимальному стоку архив содержит данные по 922 постам, из них 575 находятся на ЕТР, и 337 – на АТР. Для ЕТР площадь водосбора, ограниченная постом, в 78% случаев составляла от 1000 до 35000 км², водосборы с меньшей площадью привлекались по территории Крыма, бассейну Кубани и Терека. Водосборы с площадью более 35000 км² были единичны. Для азиатской части страны привлекались посты с площадью водосбора и более 35000 км².

Нарушения стационарности в рядах стока выявлялись с помощью теста Петтита (Pettit, 1979) – широко известного непараметрического теста, который позволяет найти дату на временной шкале (в нашем случае дата выражается номером года), до и после которой изменения медианы ряда статистически наиболее выражены. Для контроля и уточнения полученных оценок применялись графические методы анализа интегральных и разностно-интегральных кривых характеристик стока. По уточненным оценкам строились карты распределения по территории России дат нарушения стационарности в рядах стока, и выделялись регионы с условно постоянными датами. Временной период до даты нарушения стационарности считался базовым для данного региона, относительно которого оценивались изменения речного стока. Для каждого региона статистики характеристик речного стока за базовый и последующий периоды сравнивались с помощью набора параметрических (Стьюдента, Фишера и др.) и непараметрических (Манна-Уитни, Бартлетта и др.) тестов.

Помимо анализа изменений характеристик речного стока относительно базового периода нами оценивалась значимость линейных трендов за период 1950-2019 гг. также с помощью параметрического (Стьюдента) и непараметрического (Манна-Кендалла) статистических тестов.

Более подробное описание используемых данных и процедур их статистического анализа дано в статье (Фролова и др., 2022)

Методы оценки изменений речного стока до конца 21 века

Возможные изменения речного стока до конца 21 века оценивались для рек Лена, Амур, Селенга, Дон, Северная Двина, Печора, Кубань, а также незарегулированных рек бассейна Волги и рек высокогорья бассейна Терека. Выбор речных бассейнов отражает разнообразие климатических условий формирования речного стока на территории России.

Оценки производились на основе численных экспериментов с гидрологическими моделями, использующими в качестве входных величин расчетные данные глобальных моделей климата. Гидрологические модели для каждого речного бассейна строились на базе моделирующей платформы (МП) ECOMAG, состоящей из физико-математической модели формирования речного стока ECOMAG (Motovilov et al., 1999) и информационной оболочки, которая включает геоинформационные системы для обработки и визуализации пространственно распределенных данных, базы данных для задания характеристик подстилающей поверхности, входных переменных, параметров моделей и др. (Мотовилов, 2016). Физико-математическая модель описывает процессы формирования и таяния

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

снежного покрова, гидротермические процессы в почве при её промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мёрзлую и незамёрзшую почву, суммарного испарения с поверхности водосбора, стекания воды по склонам, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Примеры успешных испытаний региональных гидрологических моделей, построенных на базе МП ЕСОМАГ, по данным наблюдений в речных бассейнах площадью от десятков до миллионов км², расположенных в разных климатических условиях, даны в монографии (Мотовилов, Гельфан, 2018).

Для участков рек, подверженных затоплениям, в дополнение к гидрологической модели использовалась двумерная гидродинамическая модель STREAM 2D. С помощью гидрологических моделей прогнозировались сценарии возможного изменения стока, которые задавались в качестве краевых условий в модели STREAM 2D, и последняя рассчитывала соответствующие этим изменениям аномалии площадей затоплений. Многочисленные примеры успешного использования модели STREAM 2D для описания распространения наводнений природного и техногенного характера представлены в монографии (Беликов, Алексюк, 2020).

При расчетах речного стока в бассейне р. Терек наряду с гидрологической моделью для описания изменения площади оледенения и вклада ледникового стока использовалась гляциологическая модель GloGEMflow-debris (Postnikova et al., 2023), описывающая динамику ледника с учетом эволюции моренного покрова.

Сценарии климатических изменений в 21 веке описывались расчетными данными ансамблей глобальных моделей климата – участниц эксперимента CMIP5. Размер ансамблей – от 5 до 9 моделей климата, расчетные данные которых были скорректированы по данным наблюдений и метеорологического реанализа на первых этапах реализации международного проекта ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) (Warszawski et al., 2014). Ряды среднесуточных значений интенсивности осадков, приземной температуры и влажности воздуха, рассчитанные по данным моделей климата при четырех сценариях глобальных изменений концентраций парниковых газов до 2100 года, задавались в качестве граничных условий в региональные гидрологические модели. Пространственное разрешение задаваемых климатических данных – 0.5°. В дополнение к указанным данным нами использовались результаты климатических экспериментов piControl, в которых моделировались проекции естественного изменения климата в 21 веке без учета антропогенной составляющей (эмиссии климатически активных газов).

Результаты и их обсуждение

Анализ изменений речного стока за период наблюдений

Приведенные ниже результаты даны по работам (Джамалов и др., 2014, 2015; Киреева и др., 2018; Магрицкий и др., 2018; Фролова и др., 2017, 2020, 2022)

Результаты оценки дат нарушения стационарности в рядах годового и максимального стока показаны на рис. 2.

В центральной части ЕТР наиболее значимые изменения в рядах годового стока произошли в конце 1970-х годов; в северной и южной частях ЕТР – в середине 1980-х годов. При продвижении с запада на восток нарушение стационарности в рядах годового стока становится более поздним. Если для Западной Сибири и значительной части бассейна Енисея преобладает окрестность 1985 года, то для бассейна Байкала, Амура, Лены – 1996 года. Для крайнего северо-востока Сибири полученные результаты носят предварительный характер ввиду небольшого количества данных.

Для рядов максимальных расходов воды получена схожая картина – 1980 и 1988 годы в пределах ЕТР сменяются на 1985 год для Западной Сибири, среднего и нижнего течения Енисея и 1996 год – для бассейна Амура, Лены и северо-востока России.

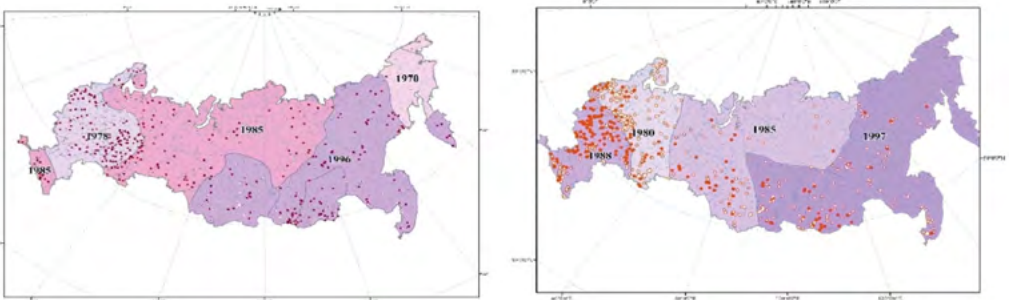


Рис. 2. Годы нарушения стационарности в рядах годового (слева) и максимального (справа) стока на территории России (точки – пункты наблюдений, заливка означает статистическую значимость при уровне значимости 10%)

Отметим, что для территории Забайкалья и Приморья годы перелома как годового, так и максимального стока совпадают и приходятся на 1996-1997 годы. Однако этот результат получен, прежде всего, по данным небольшого числа речных бассейнов: Селенги, Шилки, Аргуни, Амгуни и Уссури. За пределами этих речных бассейнов изменения носили более случайный и разнонаправленный характер.

Наибольшая доля гидрометрических постов, для которых получены статистически значимые (при уровне значимости 10%) даты нарушения стационарности в рядах годового стока, сосредоточена в кавказском регионе и центральной части ЕТР: 73 и 65% соответственно. Для крайнего северо-востока и рек бассейна Байкала эта доля равна примерно 30%. Для остальной части страны – немногим больше 50%.

Для рядов максимальных расходов воды значимые нарушения стационарности характерны для рек ЕТР: доля постов со статистически значимыми датами таких изменений составляет 80-90%. Для азиатской части эта величина уменьшается до 40-45%, и становится равной 15-25% для бассейна Лены и северо-востока страны. Таким образом, для большинства рядов стока на АТР оценки дат нарушения стационарности не значимы и можно говорить лишь о возможных тенденциях в изменениях характеристик стока.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Рассмотрим оценки изменений речного стока по сравнению с базовыми периодами для регионов России и результаты анализа трендов за многолетний период.

Карты многолетних изменений годового и максимального стока относительно соответствующих характеристик за базовые периоды для регионов России и оценки значимости этих изменений показаны на рис. 3. На рис. 4 показаны оценки линейного тренда в соответствующих рядах стока и приведена значимость этих оценок.

Как видно из приведенных иллюстраций, для рек Русской равнины характерны разнонаправленные изменения величины годового стока. На преобладающем большинстве водосборов водность рек увеличилась на 20-50 % относительно базисного периода. Особенно рост заметен для бассейна Камы, других левобережных притоков Волги, рек Северо-запада Русской равнины.

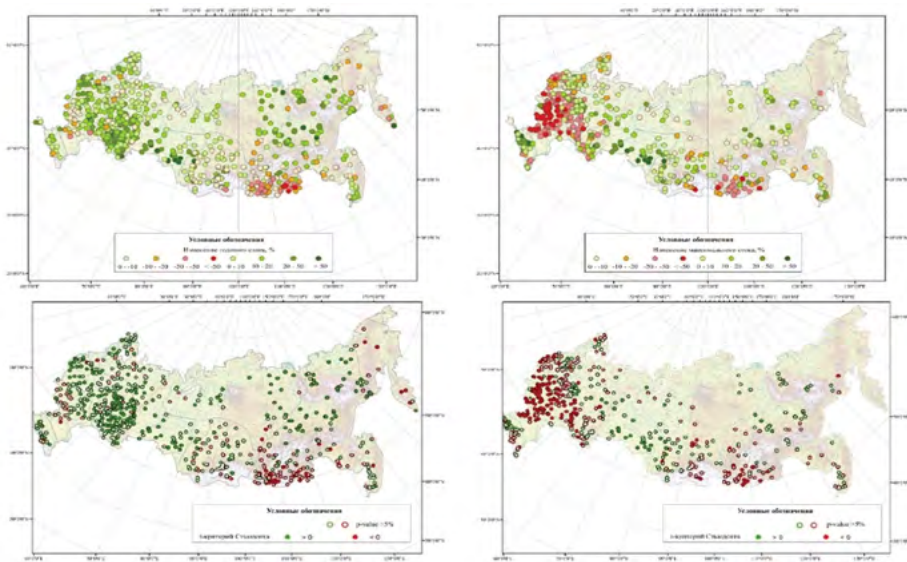


Рис. 3. Изменения годового (слева сверху) и максимального (справа сверху) стока относительно базового периода и соответствующие оценки статистической значимости (ниже) по критерию Стьюдента (уровень значимости 5%; заливка означает статистическую значимость)

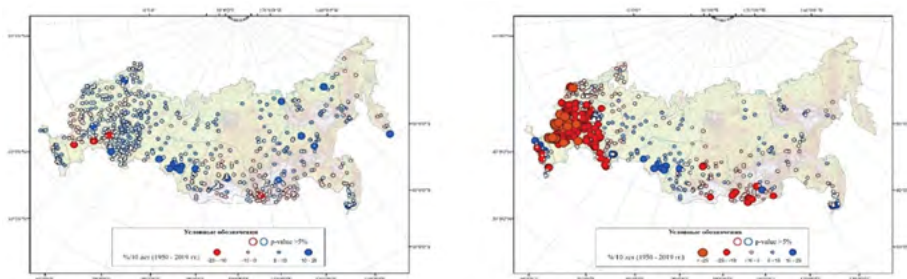


Рис. 4. Линейные тренды (%/10 лет) в рядах годового (слева) и максимального (справа) стока за период 1950-2019 гг. и их статистическая значимость по критерию Манна-Кендалла (уровень значимости 5%; заливка означает статистическую значимость)

Меньше всего изменения затронули реки Русского Севера, водосборы которых расположены преимущественно к северу от 59° с.ш. Бассейн верхнего и среднего Дона, за исключением Хопра и Медведицы, – это единственный крупный регион на Русской равнине, где в последние десятилетия выражена статистически достоверная, преобладающая тенденция снижения водности. В целом, приведенные тренды годового стока соответствуют данным раздела 1.2.1.9 Национального доклада (Третий оценочный доклад, 2022) и детализируют их.

Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растет с 1980-х годов, что объясняется явным преобладанием на водосборе этих морей постов и рек с положительными аномалиями среднегодовых расходов воды. В целом, в пределах АТР выделяются несколько регионов по местоположению, характеру и величине изменения годового стока. Реки с существенно положительными аномалиями (от 10 до 50% и больше) и преобладанием постов со статистически значимым нарушением стационарности по среднему занимают нижнюю часть бассейна Иртыша и Обь-Иртышское междуречье, восточные склоны Уральских гор, а также огромную территорию от Хатанги до Колымы. Их разделяют регионы незначительного роста (0-10%) и неоднозначной тенденции ($\pm 10\%$) – это север Западно-Сибирской равнины, средняя и нижняя части бассейна Енисея, верховья р. Оби и Ангаро-Енисейский участок. Существенно меньшую площадь занимают два региона со снижением годового стока. Первый включает верховья Лены (южнее 60° с.ш.), бассейн Селенги, верховья Амура. Здесь снижение стока наибольшее (-10...-50%) и давно обсуждается в контексте проблем оз. Байкал и притока воды к Ангарским водохранилищам, негативных тенденций в стоке Амура. Второй большой регион с отрицательными аномалиями охватывает Чукотку, северное побережье Охотского моря, большую часть Камчатского п-ова. С ней связывают убывающую тенденцию в притоке речных вод в Чукотское море. Статистически значимые положительные тренды годового стока за 1950-2019 годы присущи, как правило, рекам АТР, расположенным в районах с наиболее значительными и положительными аномалиями годового стока. Приведенные результаты во многом совпадают с выводами в отечественных и зарубежных публикациях по этому вопросу.

Перейдем к рассмотрению тенденций изменений максимальных расходов речного стока как показателя изменений масштаба потенциальных наводнений.

На ЕТР наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды фиксируется в бассейне Дона и Оки. Здесь с конца 1970-х годов снижение максимальных расходов воды в среднем по бассейнам составляет 46 и 37 % соответственно. Одновременно с этим заметно увеличивается разброс дат их прохождения. Заметно снизились весенние максимумы и в нижнем течении Волги. На западе Русской равнины также фиксируется снижение максимумов весеннего половодья, но здесь оно носит характер тенденции. На средних и крупных реках северных и восточных районов Европейской России тенденция снижения максимумов весеннего половодья практически не выражена. Снижение максимальных расходов воды было выявлено для высокогорных водосборов в бассейне Терека

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

(-5- -50%), в то время как для высокогорных водосборов бассейна Кубани заметен рост (25-50%). Предгорные водосборы в целом испытывают рост максимальных расходов. Детальная карта изменения величины максимальных суточных расходов и дат их прохождения в пределах ЕТР приведена на рис. 5.

Ситуация с максимальными за год расходами воды рек огромной и сложной по строению и климатическим условиям АТР более разнообразная. Тем не менее, удалось обнаружить следующие закономерности. Во-первых, в отличие от средних и южных областей ЕТР здесь явно преобладают реки с постами и относящиеся к ним территории с положительными аномалиями максимальных расходов. Во-вторых, их размещение схоже с распределением положительных аномалий годового стока. Причем реки на юго-востоке АТР со значительной ролью летне-осенних дождевых паводков и дальневосточного типа водного режима демонстрируют уменьшение максимальных расходов, тогда как у рек с основной фазой в весеннее половодье доминирует их увеличение.

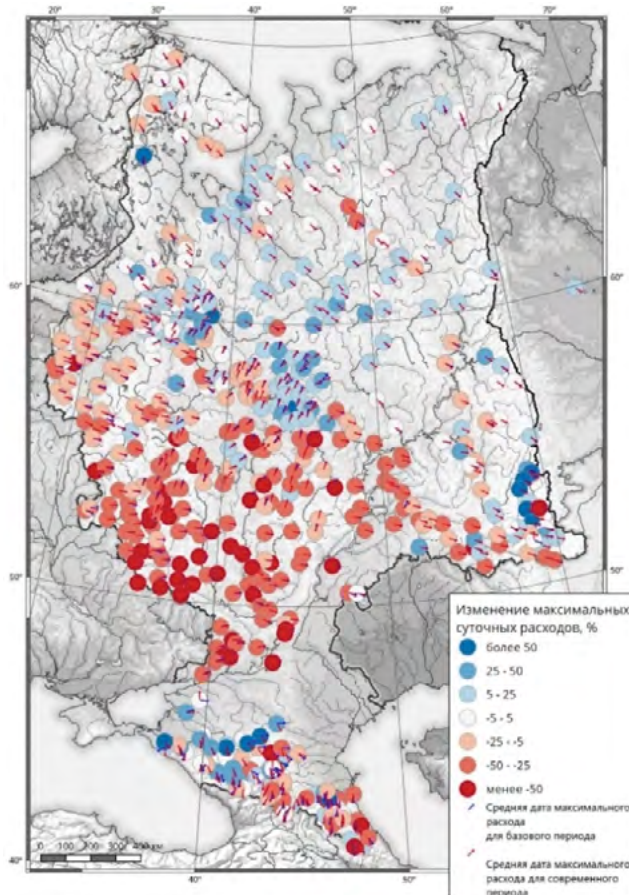


Рис. 5. Изменение максимальных суточных расходов воды (%) и средней даты их прохождения относительно базовых периодов (угол стрелки в градусах соответствует дате, отсчитываемой от верхнего ее положения)

Неоднозначные изменения (от -20/-10 до +10/+20%) получены для крайнего северо-востока АТР, местных водосборов Охотского и Японского морей, Ангаро-Енисейского участка (к югу от 60° с.ш.). Наиболее выраженная (от -10 до -50% и больше) и компактная зона с отрицательными аномалиями максимальных расходов, как и в случае с годовым стоком, расположена в Забайкалье и верховьях Амура, а с положительными аномалиями в нижней части бассейна Иртыша, на Обь-Иртышском междуречье и восточных склонах Уральских гор (+10...+50% и больше). В-третьих, статистически значимых случаев изменений максимальных расходов меньше, чем незначимых и в сравнении с годовым стоком.

Модельные оценки изменений годового и максимального речного стока до конца 21 века

Бассейн р. Лены (по работам Гельфан и др., 2018б; Крыленко, 2023; Калугин, Лупаков, 2023)

Для р. Лены положительные аномалии нормы годового стока по отношению к норме стока за период 1971–2005 гг. получены при расчетах по данным каждой глобальной модели климата из используемого ансамбля. Усредненные аномалии нормы годового стока на конец 21 века находятся в диапазоне от +19% для сценария гср2.6 до +26% для сценария гср8.5.

Численные эксперименты показали также значимый рост максимального стока Лены в 21 веке. В табл. 1 приведены средние аномалии высокого стока р. Лены, рассчитанные по данным разных моделей климата для разных периодов 21 века. Для наиболее негативного климатического сценария гср8.5 усредненная по ансамблю аномалия многолетней нормы максимального объема стока р. Лены, превышающего средний суточный расход 10%-й повторяемости, может достичь 52% на конец 21 века (2070–2099 гг.), а по данным отдельных моделей климата – 70%, т.е. гидрологическая модель прогнозирует значительный рост продолжительности периодов с высоким стоком реки. Прогнозируется также смещение весенне-летнего половодья на более ранние сроки, что приводит к увеличению объемов стока в мае и росту суммарного объема талого стока. При этом, как видно из табл. 1, отмечается большой межмодельный разброс рассчитанных аномалий максимального стока.

Для участка р. Лены у г. Якутска, подверженного частым затоплениям, были рассчитаны возможные изменения площадей и глубин затопления в 21 веке. По результатам расчетов с помощью гидродинамической модели STREAM_2D, в качестве граничного условия для которой задавались прогнозируемые гидрографы стока из гидрологической модели ECOMAG, показано, что на ключевом участке р. Лены у г. Якутска практически для всех сценариев ожидается рост средних максимальных и среднегодовых площадей, глубин затопления и скоростей течения на пойме, обусловленный ростом расходов воды. Увеличение площади затопления пойм к середине 21 века для наиболее «мягкого» сценария гср2.6 – в среднем 9%, для наиболее жесткого сценария гср8.5 – в среднем 15%, средние максимальные глубины затопления пойм увеличиваются на 14 и 25% для сценариев гср2.6 и гср8.5 соответственно.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

В последние годы появились данные экспериментов с моделями климата, позволяющих оценить вклад антропогенной составляющей изменения климата в аномалии речного стока. Для р. Лены эти возможности были реализованы в работе (Калугин, Лукаков, 2023). Использовались полученные в рамках эксперимента ISI-MIP ансамбли климатических данных, рассчитанные с учетом и без учета антропогенной эмиссии климатически активных газов.

Авторы показали, что рост стока р. Лены до конца 21 века, обусловленный совместным действием естественной и антропогенной составляющих изменения климата, оказывается более значительным, чем вследствие только естественных изменений.

Табл. 1. Рассчитанные по гидрологической модели аномалии (в %) объема стока р. Лены, превышающего расходы 10, 25 и 35%-х вероятностей превышения

Гидрологическая модель/глобальная модель климата	RCP2.6			RCP4.5			RCP6.0			RCP8.5		
	2006–2035	2036–2065	2070–2099	2006–2035	2036–2065	2070–2099	2006–2035	2036–2065	2070–2099	2006–2035	2036–2065	2070–2099
<i>Объем стока выше расхода с вероятностью превышения 10%</i>												
ECOMAG/GFDL	16	13	45	20	32	44	11	21	47	16	33	67
ECOMAG/HadGEM	11	25	28	12	36	49	10	27	45	22	30	28
ECOMAG/IPSL	28	27	41	26	29	50	30	28	50	20	36	70
ECOMAG/MIROC	11	21	17	8	25	32	5	26	34	16	28	56
ECOMAG/NorESM1	3	13	24	7	10	37	1	7	19	4	24	35
Среднее	14	20	31	15	26	42	12	22	39	15	30	52
<i>Объем стока выше расхода с вероятностью превышения 25%</i>												
ECOMAG/GFDL	24	20	44	23	32	42	19	23	39	20	30	48
ECOMAG/HadGEM	16	27	28	16	32	43	15	26	36	26	30	29
ECOMAG/IPSL	27	28	40	28	28	39	28	24	40	21	30	49
ECOMAG/MIROC	11	17	11	6	17	24	4	19	27	13	25	34
ECOMAG/NorESM1	6	15	27	13	11	34	7	8	17	6	18	26
Среднее	17	21	30	17	24	36	15	20	32	17	27	37
<i>Объем стока выше расхода с вероятностью превышения 35%</i>												
ECOMAG/GFDL	23	21	39	20	30	38	19	22	33	18	28	40
ECOMAG/HadGEM	16	28	27	16	31	41	15	27	34	26	29	27
ECOMAG/IPSL	25	27	39	26	28	35	25	23	35	21	29	42
ECOMAG/MIROC	10	17	12	5	16	23	4	19	26	12	24	31
ECOMAG/NorESM1	8	16	28	15	13	33	9	9	18	8	18	25
Среднее	16	22	29	17	24	34	15	20	29	17	26	33

Бассейны рек Амур и Селенга (по работам Гельфан и др., 2018а, Морейдо, Калугин, 2017; Millionshchikova, 2019)

На рис. 6 показаны аномалии норм годового стока рек Амур и Селенга до конца 21 века, рассчитанные с помощью гидрологических моделей бассейнов этих рек по данным глобальных моделей климата за разные периоды 21 века при четырех rcp-сценариях. Нормы стока рассчитанные по данным каждой из моделей климата усреднены по их ансамблю.

Рассчитанные аномалии нормы годового стока р. Амур в течение 21 века оказались незначимыми по отношению к естественной изменчивости стока. При сценариях гср 2.6 и гср 4.5 возможные изменения нормы годового стока р. Амур в течение 21 века практически отсутствуют – не превышают –4% относительно базового периода 1986–2005 гг. При реализации сценариев гср 6.0 и гср 8.5 возможно уменьшение водности к концу 21 века максимум на 5-7%.

Как показали численные эксперименты, возможные изменения климатических характеристик в бассейне р. Селенги в 21 веке могут привести к уменьшению водности на протяжении всего столетия при каждом из сценариев роста концентрации парниковых газов в атмосфере. Наиболее быстрый рост соответствует сценариям гср6.0 и гср8.5, при которых снижение стока может составить от 20 до 40% относительно базового периода (1991–2005 гг.). Исследование вклада различных источников неопределенности в сценарные прогнозы стока р. Селенги показали, что модельная неопределенность (различия данных моделей климата при одинаковом гср-сценарии) вносит существенно больший вклад в общую дисперсию расчетных аномалий нормы годового стока р. Селенги в первой половине 21 века, чем сценарная неопределенность (различия данных одной модели при разных гср-сценариях), но вклад последней увеличивается к концу века.

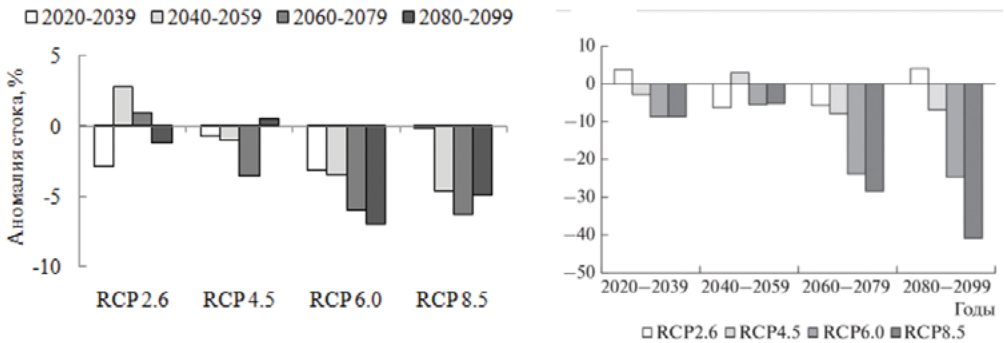


Рис. 6. Аномалии нормы годового стока р. Амур (слева) и р. Селенга (справа) рассчитанные по гидрологическим моделям на основе данных ансамбля климатических моделей. (Аномалии рассчитаны по отношению к периоду 1986–2005 гг. для р. Амур и 1991–2005 гг. для р. Селенги)

Анализ изменений стока рек ЕТР в 21 веке (по работам Калугин, 2023; Корнилова и др., 2024)

Для рек Дон, Северная Двина, Печора, Кубань, а также незарегулированных рек бассейна Волги, численные эксперименты были организованы иначе, чем описанные выше. Расчеты велись по климатическим данным не до конца 21 века, а на периоды достижения пороговых значений глобального потепления на 1.5 и 2°C относительно доиндустриальных величин. Эти периоды рассчитывались по данным двух глобальных моделей климата (GFDL-ESM2M и MIROC5). Согласно используемым данным потепление на 1.5°C будет достигнуто в период от 2033 г. (MIROC5, гср8.5) до 2056 г. (GFDL-ESM2M, гср6.0), а на 2°C в период от 2048 г. (MIROC5, гср8.5) до 2076 г. (GFDL-ESM2M, гср6.0).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Численные эксперименты показали, что при потеплении на 1.5 и 2°C годовой сток Северной Двины сократится на 11%, Волги – на 10–11% (снижение на 17–20% отмечено для Оки и Верхней Волги, в то время как для Камы – только на 1–5%), Дона – на 21 и 24%, Кубани – на 9 и 22%, а сток Печоры, наоборот, увеличится на 5 и 7% соответственно. В целом, при заданных уровнях потепления расчетные аномалии годового стока рек ЕТР будут возрастать с севера на юг и с востока на запад, т. е. гидрологические системы в более мягком климате окажутся чувствительнее к изменению климата. Анализ пространственного распределения аномалий в пределах каждого бассейна показал, что наибольшие отрицательные аномалии слоя стока могут наблюдаться в юго-западной части бассейна Северной Двины, средней части бассейна Дона, относительно равнинной части бассейна Кубани и на р. Мокше в бассейне Волги, в том время как для северной и восточной частей бассейна Печоры и рек бассейна Волги, стекающих со склонов Урала, более вероятна положительная аномалия стока.

Более значительными, согласно расчетам, оказались изменения сезонного стока: в бассейнах северной и центральной частей ЕТР вероятен большой рост зимнего стока и, почти на всех бассейнах, снижение весеннего половодья. Последнее приводит к снижению величин максимального стока 10 %-й вероятности превышения от 7–9% в бассейне Камы до 30% в бассейнах Оки и Верхней Волги. Лишь для Печоры эксперименты не показали сколько-нибудь заметных изменений максимального стока (рис. 7).

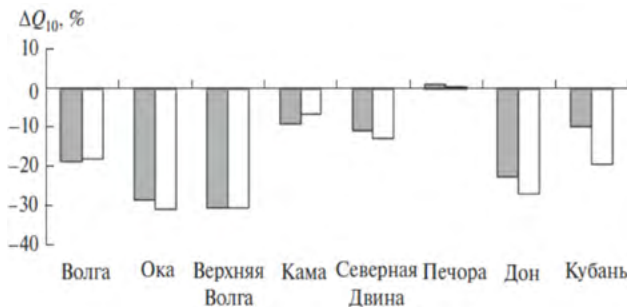


Рис. 7. Аномалии (%) максимального стока 10%-й вероятности превышения в речных бассейнах ЕТР при глобальном потеплении на 1.5 и 2°C в 21 веке относительно периода 1970–1999 гг.

Для высокогорной области бассейна р. Терек расчеты велись по данным моделей климата до конца 21 века. В работе (Корнилова и др., 2024) показано, что в разных частях рассматриваемой области возможно как снижение, так и увеличение годового стока в зависимости от степени и темпов деградации оледенения, расположения зоны снегового питания и сочетания климатических факторов (рис. 8).

Так, при реализации сценария гср8.5 сток р. Чегем начнет значительно снижаться во второй половине 21 века. При этом увеличение объемов стока рек Малки и Баксана, которые преимущественно питаются талыми водами ледников

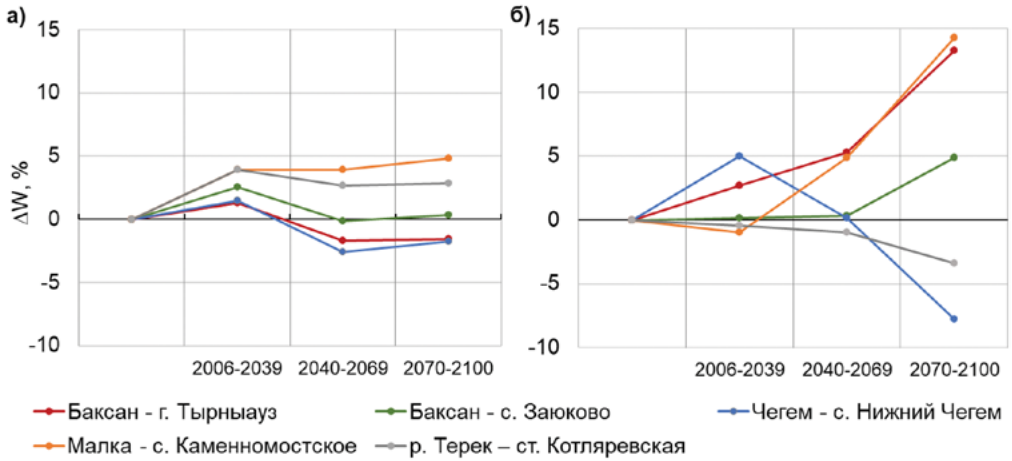


Рис. 8. Аномалии объемов годового стока (%) при климатических сценариях rsc2.6 (а) и rsc8.5 (б) относительно базового исторического периода (1977-2005 гг.) для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

и вечных снегов Эльбруса, может продолжаться вплоть до конца столетия. Модельные оценки подтверждают современные тенденции в изменениях внутри-годового распределения стока горных рек ледникового питания – сдвиг начала половодья на более ранние сроки, уменьшение объемов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы.

Заключение

Обобщены результаты анализа происходящих и оценки будущих изменений двух факторов водной безопасности, в наибольшей степени подверженных климатическим рискам, – показателя обеспеченности водными ресурсами (нормы годового речного стока) и показателя опасности наводнений (нормы максимального речного стока) на территории Российской Федерации. Показано, что на большей части территории России отмечается незначительный рост речного стока, более выраженный на реках Сибири и Дальнего Востока. Вместе с тем, в отдельных регионах России на протяжении последних десятилетий происходит статистически значимое уменьшение водообеспеченности. Из крупных регионов к ним относится бассейн Дона, в котором, за исключением его верхней части, речной сток снизился на четверть в сравнении с предшествующим 20-многолетним периодом. На АТР – это юг восточной Сибири, включая верховья Лены, Амура и Селенги (на этом основном притоке Байкала – сток снизился почти на треть). Обращает внимание характерный для некоторых регионов ЕТР (бассейн Урала, Нижняя Волга, Кавказ) заметный рост дисперсии годового стока, что может приводить к росту повторяемости и многоводных, и маловодных периодов.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Максимальный сток рек оказывается более чувствительным к изменениям климата в последние десятилетия. Для большей части территории ЕТР характерно снижение максимального стока. При этом на ряде бассейнов Северного Кавказа, в частности в бассейне Кубани – одном из наиболее паводкоопасных регионов России, максимальный сток вырос на десятки процентов. На АТР преобладают территории с ростом максимальных расходов, особенно выраженным в нижней части бассейна Иртыша, на Обь-Иртышском междуречье и восточных склонах Уральских гор.

Результаты моделирования изменений стока до конца 21 века продемонстрировали сохранение основных региональных тенденций изменений речного стока, наметившихся в последние десятилетия. При этом, оценки скорости этих изменений зависят от сценария роста концентрации климатически активных газов. Так, падение стока Селенги при наименее благоприятных сценариях может достигнуть 40%, а рост максимального стока Лены – 50% к концу 21 века. Ускорение глобального потепления до 2°C уже к последней трети 21 века может привести к еще более значимому снижению водообеспеченности в бассейне Дона, сокращению стока Верхней Волги и Оки, Кубани, на некоторых реках ледникового питания в бассейне Терека.

Полученные результаты дают основание полагать, что для ряда регионов страны уже сейчас необходим анализ актуальности и возможностей адаптации водохозяйственного комплекса к изменению климата. Эти возможности связаны с совершенствованием правил регулирования речного стока водохранилищами, эксплуатации систем водоснабжения, гидромелиорации, методов расчета гидротехнических сооружений для защиты от наводнений и других подходов к управлению водной безопасностью, традиционно базирующихся на гипотезе стационарности климата.

Благодарности

Исследования по оценке изменений водного режима рек в 21 веке проводились в рамках реализации Институтом водных проблем РАН важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». Исследования по оценке современных изменений стока рек Сибири – в рамках гранта РФФИ (проект № 24-17-00084).

Литература

1. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.
2. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока // Вод. ресурсы, 2018а, Т. 45, № 3. С. 223–234.

3. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А., Мотовилов Ю.Г. Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидрологической и глобальных климатических моделей // Вопросы географии, 2018а, Вып. 45. С. 49–63.

4. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н. Водная безопасность. Федеральный справочник № 29. Национальная безопасность России, вып. 2 «Реализация стратегических национальных приоритетов, региональное и международное сотрудничество». 2015. С. 269–275.

5. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Бугров А.А. и др. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России. М.: ИВП РАН, 2014. 96 с.

6. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.

7. Калугин А.С. Сток рек европейской территории России при глобальном потеплении на 1.5 и 2 градуса // Водные ресурсы, 2023, Т. 50, № 4, С.451–464.

8. Калугин А.С., Лукаков С.Ю. Влияние естественных и антропогенно обусловленных изменений климата на речной сток и влагозапас снега в бассейне реки Лены // Водные ресурсы, 2023, Т. 50, № 4, С. 465–476.

9. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П. и др. Паводочный сток на реках Европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 48–68.

10. Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Влияние изменений климата и деградации оледенения на водный режим в высокогорной части бассейна р. Терек // Лед и снег. 2024. (в печати)

11. Крыленко И.Н. Оценка характеристик затопления при изменениях климата // Водные ресурсы, 2023, Т. 50, № 4, С. 485–491.

12. Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М. и др. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2018. № 1. С. 90–101.

13. Морейдо В.М., Калугин А.С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в 21 веке на основе модели формирования стока // Водные ресурсы, 2017, Т. 44, № 3. С. 275–284.

14. Мотовилов Ю. Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1 Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы, 2016. № 3. С. 243–253.

15. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001.

16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Росгидромет. – СПб: Научно-технологические, 2022.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

17. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы, 2022, том 49, № 3, с. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X

18. Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю. и др. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // Вод. ресурсы. 2017. Т. 43. № 3. С. 243–255.

19. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А. и др. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26.

20. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Switzerland: Geneva, 2023.

21. Millionshchikova T. 2019. Projections of Selenga river runoff in the XXI century and uncertainty estimates // Proc. IAHS, 2019, V. 381, P. 107–112.

22. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series No 105, 1999. 88 p.

23. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change point problem // Appl. Statist, 1979, V. 28, P. 126–135.

24. Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century // Frontiers in Earth Science, 2023, V. 11, № 1. P. 1–22.

25. UNESCO-IHP. Strategic Plan of the Eighth Phase of IHP (IHP-VIII, 2014–2021). Paris, France: UNESCO-IHP, 2012.

26. Warszawski L, Frieler K, Huber V, Piontek F, Serdeczny O and Schewe J 2014 The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework Proc. Natl Acad. Sci. 111 3228–32

О РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЯХ ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА¹

А.В. Матешева^{1,2*}, А.А. Макоско^{1,2,3}, С.В. Емелина^{1,4,5}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

²Российский университет транспорта

³Российская академия наук

⁴Гидрометцентр России

⁵Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

**matesheva@ifaran.ru*

Аннотация. Исследованы региональные тенденции рисков здоровью человека, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности, на территории России за 2020–2050 гг. с учетом двух климатических сценариев. В целом ожидается умеренная динамика рисков, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по климатическим районам страны. В отдельных районах отмечены весьма заметные тренды, прежде всего, на территории Сибири. Показана необходимость в дополнительном внимании при планировании мер адаптации к изменениям климата в южных и центральных областях Европейской территории России, на большей части территорий Западной Сибири, в Магаданской области и на Камчатке.

Ключевые слова: изменение климата, загрязнение атмосферы, риск для здоровья, погодно-климатическая комфортность, адаптация

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата, которые в России, особенно в высоких широтах, происходят быстрее и масштабнее (Доклад о климатических рисках..., 2017; Третий оценочный доклад..., 2022), чем в среднем по Земному шару, ведут к изменению комфортности (характерных погодно-климатических условий), что может приводить к угрозам здоровью человека в виде повышения заболеваемости и снижения производительности труда. В загрязненной атмосфере данные угрозы становятся более опасными, поскольку изменение

¹Работа является расширенной и обновленной версией статьи авторов: Макоско А.А., Матешева А.В., Емелина С.В. О тенденциях рисков для здоровья от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности на территории России в условиях изменяющегося климата. — Метеорология и гидрология, 2024, № 2, с. 107—119.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

метеорологических условий способно усиливать неблагоприятное воздействие вредных примесей на организм (Макоско А.А. и др., 2020; Ревич Б.А., 2020). Например, при потеплении климата в Северном полушарии возрастет вероятность таких погодных явлений, как штормы, тайфуны, ураганы, увеличится число дней с высокой температурой воздуха, когда, как правило, наблюдается и повышенный уровень загрязнения атмосферы (Макоско А.А. и др., 2020; Третий оценочный доклад..., 2022). В дополнение к этому вариации общей циркуляции атмосферы вследствие изменений климата могут привести к заметному перераспределению количества поступающих примесей и областей (источников), оказывающих влияние на регионы при дальнейшем загрязнении (Макоско А.А. и др., 2017; Makosko A.A., 2020). Это в том числе означает возможное изменение уровня общего загрязнения атмосферы и качества воздуха на различных территориях. В связи с этим изучение рисков, связанных с влиянием загрязнения атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности на человека на территории России в условиях изменяющегося климата, представляет научный и практический интерес.

Целью настоящей работы является изучение региональных тенденций рисков для здоровья, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением комфортности погодно-климатических условий, на территории России за 2020–2050 гг. при различных сценариях климатических изменений.

Метод и материалы исследования

Исследование риска для здоровья вследствие загрязнения атмосферы под влиянием погодно-климатических процессов в условиях меняющегося климата основывается на методологии оценки риска для здоровья от загрязнения окружающей среды US EPA (Air Toxics Hot Spots Program, 2015) и предполагает оценку общего токсического эффекта для организма, который характеризует неканцерогенный риск. С учетом (Air Toxics Hot Spots Program, 2015) возможное возникновение неонкологических заболеваний от загрязнения воздуха характеризуется показателем относительной опасности загрязнителя, который представляет собой критический уровень содержания в атмосфере вещества, воздействующего на человека. Критическими уровнями могут являться предельно допустимые концентрации (ПДК) или референтные концентрации, отражающие безопасный уровень воздействия. Оценка риска как вероятности развития неонкологических заболеваний, обусловленных загрязнением атмосферы, проводится путем сравнения расчетной среднегодовой и критической концентраций (Air Toxics Hot Spots Program, 2008, 2015; Руководство по оценке риска..., 2004; Integrated Risk Information System (IRIS) Database):

$$h = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{H_i}, \quad (1)$$

где h — индекс относительной опасности неонкологических заболеваний (индекс опасности для здоровья) от загрязнения атмосферы; q_j — расчетная средне-

годовая концентрация i -го вещества в атмосфере, мкг/м³; H_i – критическая концентрация i -го вещества, мкг/м³.

Приемлемым уровнем суммарного индекса опасности неонкологических заболеваний считается единица и менее.

Существенную трудность в исследовании представляет оценка концентраций примесей, которая обусловлена рядом особенностей.

Первая особенность заключается в значительном количестве потенциальных источников, включая трансграничные, и наличии различных механизмов загрязнения атмосферы, вторая – в неопределенности количества, расположения и мощности источников потенциального воздействия на атмосферу.

В связи с этим для оценки концентраций применен метод решения сопряженной задачи (Марчук Г.И, 1982; Макоско А.А. и др., 2017; Макоско А.А. и др., 2020), с помощью которого можно оценить степень потенциальной опасности загрязнения атмосферы в заданной зоне от всех источников, расположенных в области решения задачи, при заданных сценариях метеорологического режима атмосферы.

Отметим, что комбинированные подходы прямого и обратного моделирования, как подчеркнуто в (Penenko V.V., 2015), в последние годы все чаще применяются для связи результатов возможных воздействий, выраженных в виде целевых функционалов, с параметрами моделей и источников.

Для решения задачи рассматривается эволюция примеси q в атмосфере над Северным полушарием (область Ω) в пределах $0 \leq z \leq H$ (H – высота тропопаузы) со скоростью, характеризующей средний перенос в тропосфере (для определенности отнесем его к поверхности 500 гПа). Обобщение данного методического подхода на трехмерный случай осуществляется тривиально.

Следуя основной задаче переноса и диффузии примеси (Марчук Г.И, 1982; Алоян А.Е., 2002; Макоско А.А. и др., 2022), ставим в соответствие сопряженную задачу на основе тождества Лагранжа (Марчук Г.И, 1982):

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial q^*}{\partial t} - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial u q^*}{\partial \lambda} - \\ & - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial v \sin \psi q^*}{\partial \psi} - \frac{1}{a^2 \sin^2 \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mu \frac{\partial q^*}{\partial \lambda} - \\ & - \frac{1}{a^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \mu \sin \psi \frac{\partial q^*}{\partial \psi} + \sigma q^* = p; \end{aligned} \quad (2)$$

где $q^* = 0$ при $t = T$; u, v – составляющие скорости ветра по долготе и кошироте соответственно, м/с; a – средний радиус Земли, м; μ – коэффициент горизонтального турбулентного обмена, м²/с; $\sigma \geq 0$ – параметр, обратный величине интервала времени, за который интенсивность примеси по сравнению с начальной уменьшится в e раз, и характеризующий степень поглощения примеси каплями тумана, ее химические превращения, радиоактивный распад и др., с⁻¹; λ, ψ – долгота и

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

коширота сферической системы координат, град; t – время, с; p – функция, характеризующая экологически значимые зоны G ($G \in \Omega$), например, различные районы Арктической зоны; $0 \leq t \leq T$, T – заблаговременность (интервал) расчетов, с.

Решение сопряженной задачи есть сопряженная функция q^* (Марчук Г.И., 1982), которая является весовой функцией, определяющей вклад каждого источника загрязнения I в величину загрязнения атмосферы в экологически значимой зоне (заданном районе) G .

Если в качестве основного рассматривать функционал

$$Q = (q, p) = \int_0^T dt \int_G q p d\Omega,$$

то из тождества Лагранжа следует двойственная форма этого функционала (Марчук Г.И., 1982)

$$Q = (q^*, I). \quad (3)$$

Выбрав в уравнении (2) функцию p в виде

$$p = \begin{cases} 1/(T \cdot G), & \vec{r} \in G \\ 0, & \vec{r} \notin G \end{cases}$$

где $\vec{r} = (\lambda, \psi)$, получим функционал

$$Q = \int_0^T dt \int_G I q^* d\Omega, \quad (4)$$

который будет характеризовать интегральный по территории рассматриваемого района G эффект загрязнения атмосферы за время T от источников, расположенных в области Ω .

Исследование риска для здоровья от загрязнения атмосферы выполняется на основе осредненных за определенный период T (за год) концентраций примесей. Поэтому функционал (4) принимает вид

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_G I q_i^* d\Omega. \quad (5)$$

Относя выражение (5) к i -му веществу, с учетом (1) запишем выражение для расчета индекса опасности для здоровья, обусловленного i -й примесью в атмосферном воздухе (Макошко А.А. и др., 2022):

$$h_i = \frac{1}{H_i T} \int_0^T dt \int_G I_i q_i^* d\Omega. \quad (6)$$

В общем виде выражение для расчета индекса опасности для здоровья от загрязнения атмосферы всеми примесями, поступающими от источников области Ω , примет вид

$$h = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{H_i}. \quad (7)$$

При долгосрочных оценках информация о будущих выбросах и источниках, как правило, отсутствует. В этом случае представляется возможным рассматривать источник с единичным выбросом. Тогда выражения (6) и (7) будут характеризовать единичные нормированные риски или индексы опасности от загрязнения атмосферы только вследствие влияния погодно-климатических процессов. Если мощность источника станет известна (например, появится план развития территории или будет рассматриваться влияние на регион конкретного источника), будет достаточно (в линейном приближении влияния мощности источника, что допустимо при долгосрочном планировании) соответствующие члены подынтегральных выражений в (5) и (6) или соответствующие слагаемые выражения (7) умножить на фактическое значение выбросов.

Для решения сопряженного уравнения переноса и диффузии примеси и получения полей сопряженных функций используется численная модель, применявшаяся ранее в других работах авторов, включая решение сопряженной задачи в трехмерной постановке (Макоско А.А. и др., 2020). Поэтому ниже отметим только некоторые особенности ее построения.

Областью решения задачи является Северное полушарие. Сеточная область численной модели составляет 90×360 узлов. Шаг сетки модели – 1° . Для численного решения сопряженного уравнения турбулентной диффузии использован метод расщепления (Марчук Г.И., 1982; Марчук Г.И. и др., 1987). Учет фотохимических процессов, коагуляции, поглощения каплями тумана и осадков, радиоактивного распада осуществляется неявно. Поля ветра и других метеовеличин для расчетов по численной модели авторов при расчетах берутся либо из реанализов, либо из результатов сценарных расчетов изменения климата. Это обеспечивает возможность оценки динамики риска в условиях изменяющегося климата.

Исследование риска для здоровья человека, обусловленного изменением комфортности погодно-климатических условий, базируется на использовании биометеорологических индексов, характеризующих степень влияния погодно-климатических условий на человека (Руководство по специализированному обслуживанию..., 2008; Emelina S.V. et al., 2014). При выборе биометеорологических индексов, помимо их назначения, учитывается доступность прогностических метеорологических параметров, необходимых для расчета данных индексов.

В связи с этим для холодного времени года дискомфорт погодных условий оценивается по значениям индекса суровости погоды Бодмана (Руководство по специализированному обслуживанию..., 2008; Исаев А.А., 2001), характеризую-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

щего «жесткость» зимней (холодной) погоды в условных единицах по шкале в баллах: «несуровая, мягкая» ($S \leq 1$), «мало суровая» ($S = 1-2$), «умеренно суровая» ($S = 2-3$), «суровая» ($S = 3-4$), «очень суровая» ($S = 4-5$), «жестко суровая» ($S = 5-6$), «крайне суровая» ($S \geq 6$). Баллы рассчитываются по формуле

$$S = (1 - 0,04t)(1 + 0,272v), \quad (8)$$

где t – температура воздуха, °C; v – скорость ветра, м/с.

Для оценки комфортности погодно-климатических условий в летнее время года использовался индекс эквивалентно-эффективной температуры (Руководство по специализированному обслуживанию..., 2008; Айзенштат Б.А. и др., 1974):

$$\begin{aligned} \Delta \Delta \Delta_A = & t[1 - 0,003(1 - f)] - \\ & - 0,385v^{0,59} [(36,6 - t) + 0,622(v - 1)] + \\ & + (1 - f)[(0,0015v + 0,0008)(36,6 - t) - 0,0167], \end{aligned} \quad (9)$$

где f — относительная влажность, %.

Тепловая чувствительность по значениям данного индекса имеет следующую классификацию: «сильная» ($EET_A \leq +30$), «умеренная» ($EET_A = +24...+30$), «комфорт» ($EET_A = +18...+24$), «умеренно тепло» ($EET_A = +12...+18$), «прохладно» ($EET_A = +6...+12$), «умеренно прохладно» ($EET_A = 0...+6$), «холодовой дискомфорт» ($EET_A \leq 0$).

Исследование рисков здоровью человека, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности в условиях изменяющегося климата, проводилось на основе районирования территории России с учетом климатических зон России согласно классификации климатов Б.П. Алисова (Алисов Б.П., 1969). Это позволило одновременно учитывать особенности атмосферной циркуляции, оказывающей влияние на распространение загрязняющих примесей, и сочетание характерных погодно-климатических факторов, в той или иной мере влияющих на организм человека.

В итоге выделено 20 районов, включая Калининградскую область и Крымский п-ов. Для каждого из них за 2020—2050 гг. с шагом пять лет рассчитаны:

- среднегодовые значения единичного нормированного риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы частицами PM10, PM2.5, оксидом углерода, оксидами азота, диоксидом серы с учетом выбросов от всех возможных источников, расположенных как в рассматриваемом районе, так и за его пределами, включая источники трансграничного поступления примесей;
- индексы комфортности (дискомфорта) погодно-климатических условий для каждого сезона года.

Проведены две серии расчетов указанных индексов с учетом двух характерных сценариев изменения климата в XXI столетии из семейства RCP (Representative Concentration Pathways) — «умеренного» (RCP4.5) и «жесткого» (RCP8.5), соответствующих различному уровню антропогенного воздействия на климатическую систему (Climate Change..., 2014). Выбор в пользу сценариев RCP, несмотря на наличие новой группы сценариев SSP (Shared Socio-economic pathways) (Van Vuuren D.P. et al, 2014), отличающихся от RCP дополнительным учетом в явном виде роли социально-экономических факторов в воздействии на климат, обусловлен отсутствием на момент исследования результатов моделирования климатических изменений в необходимом для использования в настоящем исследовании временном разрешении. В качестве необходимых полей метеовеличин использовались данные реанализа (NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses...) для 2020 г. и данные расчетов по климатической модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН для периода 2025–2050 гг. (по сценариям RCP4.5 и RCP8.5) (Volodin E. et al, 2013a,b).

Анализ динамики рассчитанных индексов выявил тенденции рисков здоровью от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности, что послужило основой для определения по обоим климатическим сценариям территорий, требующих внимания при планировании мер по адаптации к изменениям климата в РФ с целью управления исследуемыми рисками.

Оценки потребности в адаптационных мерах определялись на основе подхода к интегральной оценке патогенности погодных условий (Васин В.А., 2009).

Этот подход подразумевает учет порядка 15 показателей, характеризующих состояние атмосферы, для выполнения медицинского прогноза погоды. Принимая во внимание климатический временной масштаб настоящего исследования и необходимость ранжирования территорий по потребности в адаптационных мерах вследствие изучаемых рисков, формула интегрального индекса патогенности погоды, представленного в (Васин В.А., 2009), сокращена до двух показателей, учитывающих комфортность погодно-климатических условий и опасность от загрязнения атмосферы:

$$k = \frac{k_{\text{АТМ}}(h') + k_{\text{СОМФ}}(S', \text{ЕЕТ}'_A)}{n}, \quad (10)$$

где k – интегральный индекс, характеризующий прогнозируемые тенденции эколого-климатических рисков по степени выраженности потенциального неблагоприятного эффекта для здоровья при изменении рисков и, соответственно, потребности в мерах по адаптации; $k_{\text{АТМ}}$ – индекс, характеризующий вариации риска для здоровья от загрязнения атмосферы по степени потенциального эффекта; h' – вариации среднегодового значения единичного нормированного риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы; $k_{\text{СОМФ}}$ – индекс, характеризующий вариации комфортности погодно-климатических усло-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

вий по степени потенциального эффекта; S' , EET'_A – вариации среднегодовых значений погодно-климатической комфортности; $n = 2$ – число рассматриваемых показателей.

Необходимо пояснить, что использование здесь среднегодовых значений комфортности погодно-климатических условий, несмотря на то, что выше речь шла о сезонных показателях, обусловлено необходимостью соблюдения единообразия по времени (корректности) в получаемой интегральной оценке риска от двух изучаемых факторов.

Данный подход является вполне допустимым, учитывая столь большую заблаговременность проводимых оценок. При этом, очевидно, что итоговый результат получается более сглаженным.

Поскольку подобные исследования ранее не проводились, категории степени выраженности неблагоприятных эффектов на здоровье в зависимости от динамики рисков и соответствующие им значения индексов k_{ATM} , k_{COMF} (табл. 1), а также балльная шкала для определения интегрального индекса k и соответствующие баллам характеристики тенденций рисков (табл. 2) взяты близкими к данным в (Васин В.А., 2009) с поправкой на то, что в настоящей работе рассматриваются не абсолютные значения, а именно вариации рисков.

Значения индексов в зависимости от направления трендов могут быть положительными (при повышении риска) или отрицательными (при снижении риска).

Табл. 1. Индексы k_{ATM} , k_{COMF} в зависимости от динамики эколого-климатических рисков

Категория динамики риска	Выраженность негативных эффектов при изменении риска	Индексы k_{ATM} , k_{COMF}
Без динамики	Без изменений	0
Незначительная динамика: $h' < 10\%$; S' , $EET'_A = 1$ градации	Незначительное снижение/повышение	0,1—0,3
Заметная динамика: $h' = 10—20\%$; S' , $EET'_A = 2$ градациям	Заметное снижение/повышение	0,4—0,6
Выраженная динамика: $h' = 20—30\%$; S' , $EET'_A = 3$ градациям	Выраженное снижение/повышение	0,7—0,9
Очень сильная динамика: $h' > 30\%$; S' , $EET'_A > 3$ градаций	Очень резкое снижение/повышение	1

Табл. 2. Характеристика тенденций эколого-климатических рисков по значениям индекса k

Интегральная характеристика выраженности негативных эффектов при изменении рисков	Интегральный индекс k	Характеристика тенденций риска
Без изменений	0,00–0,09	Нейтральная: необходим контроль и текущие мероприятия по обеспечению экологической безопасности и охране здоровья. Дополнительные меры по адаптации не требуются
Незначительное снижение/повышение	0,1–0,29	Благоприятная / условно неблагоприятная: требуются контроль и при негативной динамике – разработка базового плана по адаптации
Заметное снижение/повышение	0,3–0,49	Благоприятная / неблагоприятная: требуются контроль и при негативной динамике – разработка усиленного плана по адаптации, включающего расширенный комплекс мер
Выраженное снижение/повышение	0,5–0,69	Благоприятная высокой степени / неблагоприятная высокой степени: требуются контроль и при негативной динамике – усиление мониторинга и контроля, расширенный анализ рисков и разработка на его основе плана по адаптации
Очень сильное снижение/повышение	0,7–1,00	Особо благоприятная / особо неблагоприятная: требуются контроль и при негативной динамике – усиление мониторинга и контроля, расширенный анализ рисков и проведение дополнительных междисциплинарных исследований по воздействию изменений климата на человека, а также разработка на их основе плана по адаптации

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены *тренды среднегодового риска здоровью от загрязнения атмосферы* за период 2020—2050 гг. по климатическим районам России с учетом различных сценариев изменения климата.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

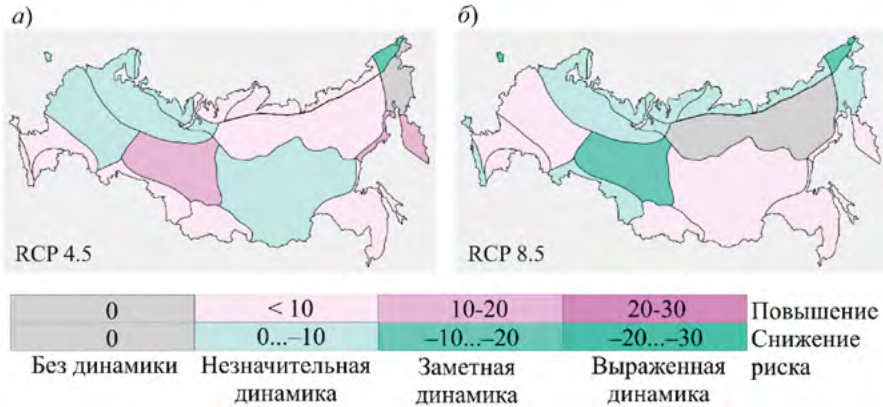


Рис. 1. Распределение трендов (%) единичного нормированного среднегодового риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы по климатическим районам РФ в 2020-2050 гг. с учетом сценариев климата: а) RCP4.5; б) RCP8.5

Расчитанные тренды показывают, что при сценарии изменения климата RCP4.5 большинство территорий характеризуется незначительной динамикой риска здоровью – тренд менее 10 %. При этом на отдельных территориях риск может измениться более заметно: в центре Западной Сибири, на Камчатке и Охотском побережье Магаданской области – на 15 % в сторону увеличения опасности, а на Чукотке – на 10 % в сторону снижения.

При сценарии RCP8.5 также можно отметить на большинстве территорий незначительные изменения риска для здоровья. В то же время значимая тенденция к снижению опасности (тренд 10 %) показана для Калининградской области и центра Западной Сибири. Более выраженное снижение риска (на 18 %) определяется на Чукотке.

В целом для обоих сценариев характерны тенденции к незначительным или вполне умеренным изменениям уровня опасности для здоровья от загрязнения атмосферы, которые, однако, по-разному распределены по территории страны. Характер динамики риска в данном случае объясняется изменением направлений дальнего (трансграничного) переноса примесей в результате активизации меридионального переноса воздушных масс из-за вариаций циркуляции атмосферы вследствие изменений климата.

На рис. 2 представлены **тренды погодно-климатической комфортности (дискомфорта)** для каждого сезона в сторону повышения или снижения в виде изменения градаций теплоощущений за период 2020—2050 гг. по климатическим районам России с учетом различных сценариев изменения климата.

Полученные тренды позволяют сделать вывод, что к 2050 г. зимой по обоим сценариям на обширной территории страны (юг Европейской территории России (ЕТР), континентальные районы Сибири, побережье Карского моря) ожидается умеренное снижение комфортности; по сценарию RCP8.5 – также в центре ЕТР. Без существенных изменений по обоим сценариям останется ситуация в

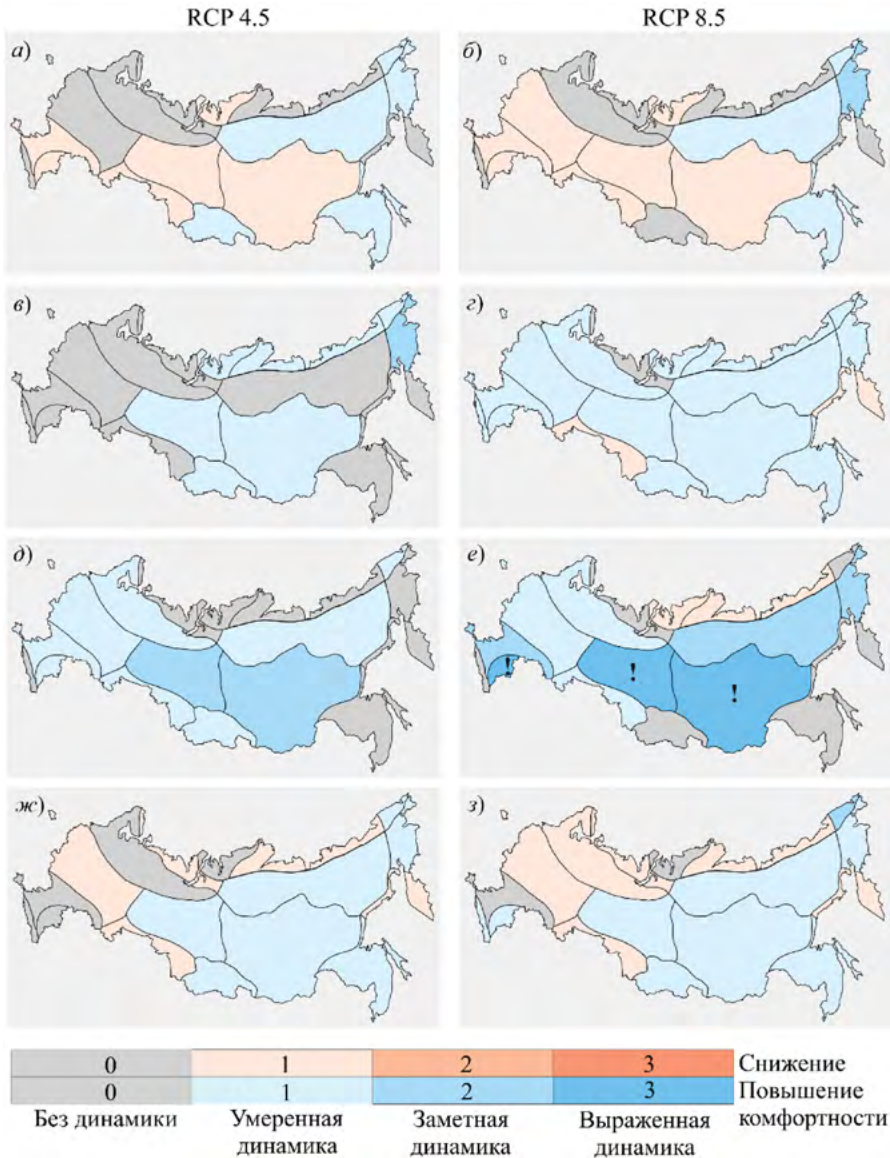


Рис. 2. Распределение трендов погодно-климатической комфортности (в виде изменения градаций теплоощущений) для каждого сезона года (а, б – зима; в, г – весна; д, е – лето; ж, з – осень) по климатическим районам РФ за период 2020-2050 гг. с учетом сценариев климата: RCP4.5 (а, в, д, ж) и RCP8.5 (б, г, е, з). Восклицательный знак отмечает, что возможен переход из холодного дискомфорта в тепловой

Причерноморье, горах Кавказа, на севере ЕТР и Западной Сибири, восточно-сибирском побережье Северного Ледовитого океана (СЛО), Камчатке и Охотском побережье Магаданской области; по сценарию RCP4.5 – также в центре ЕТР, а по сценарию RCP8.5 – в горном Алтае и Саянах. Тенденции в сторону повышения

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

комфортности по обоим сценариям показаны для сибирской и тихоокеанской областей субарктического пояса, на Чукотке, юге Дальнего Востока; при сценарии RCP4.5 – также в горном Алтае и Саянах. Наиболее заметное смягчение *погодно-*климатических условий (на 2 градации) характерно для побережья Берингова моря при сценарии RCP8.5.

Весной при сценарии RCP4.5 около половины территорий страны остается без существенной динамики комфортности (ЕТР, север и юг Западной Сибири, север Восточной Сибири без арктического побережья, Камчатка, Охотское побережье Магаданской области, юг Дальнего Востока), в то время как другая половина – характеризуется умеренным (в арктическом поясе, континентальных районах Сибири, Горном Алтае и Саянах), либо заметным (на побережье Берингова моря) повышением комфортности. Согласно сценарию RCP8.5, практически на всей территории РФ прослеживается тенденция к умеренному смягчению погодно-климатических условий, кроме атлантической области субарктического пояса, где динамика отсутствует, и юга Западной Сибири, Камчатки и Охотского побережья Магаданской области, где ожидается усиление дискомфорта на 1 градацию.

Летом в целом по обоим сценариям почти на всей территории РФ ожидается повышение комфортности от умеренного до выраженного. Наиболее выражены (на 3 градации) тенденции в сторону смягчения погодно-климатических условий при сценарии RCP8.5 в Прикаспии и континентальных областях Сибири, что на данных территориях способно привести даже к переходу в сторону умеренного теплового дискомфорта. Без динамики остается ситуация в Причерноморье, горах Кавказа, атлантической области субарктического пояса, на Камчатке и Охотском побережье Магаданской области, юге Дальнего Востока; при сценарии RCP4.5 – также в арктическом поясе, кроме Чукотки, и на побережье Берингова моря, при сценарии RCP8.5 – также на Чукотке, в горном Алтае и Саянах. При сценарии RCP8.5, помимо этого, отмечается умеренное усиление дискомфорта на сибирском побережье СЛО.

Осенью по обоим сценариям большая часть территории Сибири и Дальнего Востока характеризуется умеренным повышением комфортности (более заметно, на 2 градации, комфортность повысится на Чукотке при сценарии RCP8.5). Для ЕТР и отдельных районов Сибири и Дальнего Востока, напротив, характерно умеренное снижение комфортности либо отсутствие динамики. В частности, при сценарии RCP4.5 дискомфорт усиливается в центре ЕТР, на юге Западной Сибири, на арктическом побережье ЕТР и в центре Ямала, на восточно-сибирском побережье СЛО, Камчатке и Охотском побережье Магаданской области; при сценарии RCP8.5 – также на севере ЕТР.

В целом для многих районов РФ по обоим сценариям характерны умеренные изменения погодно-климатической комфортности. Наиболее заметные и даже выраженные вариации отмечаются летом на юге ЕТР, в большей части Сибири и на побережье Берингова моря. Полученные оценки согласуются с ожидаемыми изменениями температурного, влажностного и ветрового режимов.

На рис. 3 представлено *распределение по климатическим районам России среднегодового индекса k , отражающего интегральную оценку выявленных тенденций рисков для здоровья (среднегодовых)* в 2020—2050 гг. при двух климатических сценариях. Положительные и отрицательные значения индексов характеризуют соответственно снижение и повышение потенциального неблагоприятного воздействия на человека рассматриваемых факторов. Районы, окрашенные желтым цветом (диапазон значений k от 0,00 до $\pm 0,09$), характеризуются нейтральным эффектом.

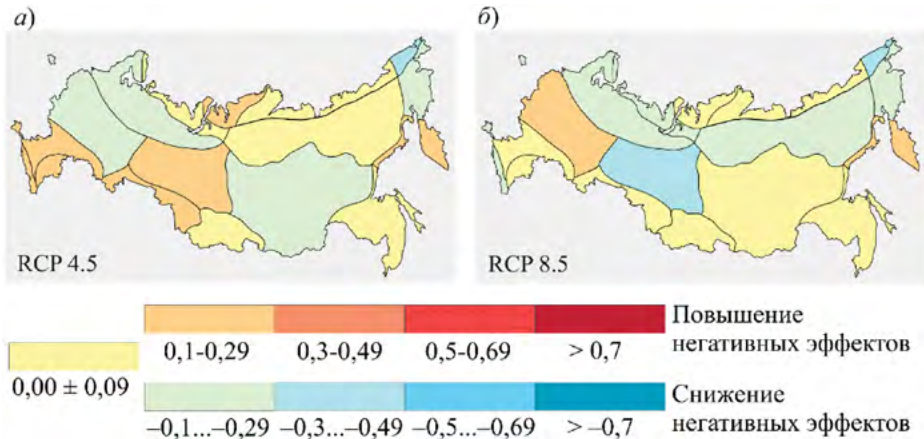


Рис. 3. Распределение интегрального среднегодового индекса k по климатическим районам РФ за период 2020-2050 гг. с учетом сценариев климата: а) RCP4.5; б) RCP8.5

Согласно интегральным оценкам, по обоим климатическим сценариям прогнозируются условно неблагоприятные тенденции исследуемых рисков, свидетельствующие о незначительном или умеренном усилении неблагоприятного воздействия на здоровье человека, на Камчатке и в Магаданской области; при сценарии RCP4.5 – также на юге ЕТР и большей части территорий Западной Сибири; при сценарии RCP8.5 – также в центре ЕТР. Таким образом, можно сделать заключение, что с позиции двух факторов – загрязнения атмосферы и *погодно*-климатической комфортности – требуется дополнительное внимание к указанной совокупности территорий при планировании мер по адаптации к изменениям климата. На остальных территориях страны при данных сценариях ситуация остается без изменений или наблюдаются благоприятные тренды, и дополнительные меры по адаптации к изменениям климата с учетом динамики рассматриваемых рисков не требуются. Так, уверенная тенденция к незначительному (умеренному) снижению негативных эффектов для здоровья по обоим сценариям проявляется для северных районов ЕТР и Западной Сибири, побережья Берингова моря; к заметному снижению – на Чукотке. Следует выделить и результаты расчетов для центральной части Западной Сибири, где при реализации сценария RCP8.5 отмечается весьма заметная тенденция к улучшению качества атмосферного воздуха и повышению *погодно*-климатической комфортности. В

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

завершение анализа важно также отметить, что полученные результаты представляются достаточно осредненными по нескольким причинам. Во-первых, в настоящем исследовании выполнены интегральные среднегодовые оценки рисков, в результате чего произошло некоторое сглаживание сезонных всплесков изучаемых рисков. Другая причина – *методического характера* – *состоит в том, что в настоящее время ни лежащий в основе подход* [4], ни другие известные методы не позволяют учитывать нелинейность действия изучаемых факторов на организм человека, что крайне затрудняет учет вклада каждого из них и их совместного действия. Направлением дальнейших исследований авторов является более детальное изучение сезонных особенностей рассматриваемых рисков, а также поиски путей совершенствования методического аппарата для решения поставленных задач.

Выводы

В настоящей работе исследована динамика рисков для здоровья человека на территории России, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности, в 2020–2050 гг. при двух сценариях климатических изменений.

Согласно оценкам, в период до 2050 г. ожидается в целом умеренная динамика исследуемых рисков, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по территории страны. В отдельных районах наблюдаются заметные тренды. Показана необходимость в дополнительном внимании при планировании мер адаптации к изменениям климата в южных и центральных областях ЕТР, на большей части территорий Западной Сибири (преимущественно на юге и в центре), в Магаданской области и на Камчатке. Учитывая высокую плотность населения и наличие крупных промышленных узлов на некоторых территориях, повышается актуальность в более детальном изучении опасности от загрязнения атмосферы и динамики погодно-климатической комфортности в условиях изменяющегося климата.

Поскольку в настоящее время ряд таких территорий, как Арктика, Дальний Восток, некоторые южные районы становятся центром притяжения все больших стратегических интересов России, различных инвесторов и спектр видов экономической деятельности со временем здесь будет расширяться, полученные результаты представляются весьма актуальными при планировании пространственного развития страны, в частности — в решении задач управления экологическими и климатическими рисками в целях создания комфортных условий для обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего и работающего на территориях опережающего социально-экономического развития РФ. Отдельный интерес полученные оценки могут представлять для транспортного комплекса и других отраслей, где значимый ряд профессий и рабочих мест связан с длительным пребыванием работников на открытом воздухе.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (стратегический проект № 5 Российского университета транспорта), а также при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 22-17-00247).

Литература

1. Айзенштат Б.А., Айзенштат Л.Б. Формула для расчета эквивалентно-эффективной температуры. – *Вопр. Биометеорологии*, 1974, № 20 (101).
2. Алисов Б.П. *Климат СССР*. – М.: Выс. школа, 1969, 104 с.
3. Алоян А.Е. *Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере*. – М.: ИВМ РАН, 2002, 201 с.
4. Васин В.А., Голицын Г. С., Гранберг И. Г. и др. Система медицинского прогноза погоды на федеральных курортах Кавказских Минеральных Вод: Методическое пособие. – *Пятигорск: ПНИИК ФФГБУ ФМБА России*, 2009, 23 с.
5. *Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации*. – СПб.: Росгидромет, ГГО, 2017, 106 с.
6. Исаев А.А. *Экологическая климатология*. – М.: Науч. мир, 2001, 456 с.
7. Макоско А.А., Матешева А.В. *Оценки тенденций дальнего загрязнения атмосферы регионов российской Арктики в XXI в.* – *Арктика: экология и экономика*, 2017, № 4 (28), с. 59–71; DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71.
8. Макоско А.А., Матешева А.В. *Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы*. – М.: Рос. акад. наук, 2020, 257 с.
9. Макоско А.А., Матешева А.В., Емелина С.В. *О тенденциях рисков для здоровья от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности на территории России в условиях изменяющегося климата*. – *Метеорология и гидрология*, 2024, №2, с. 107–119.
10. Марчук Г.И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. – М.: Наука, 1982, 320 с.
11. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В. Б. *Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации*. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987, 296 с.
12. Ревич Б.А. *Здоровье населения Арктики в условиях меняющегося климата и загрязнение окружающей среды: задачи мониторингов / В сб.: II Всерос. науч. конф. с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны». Расширенные тезисы докладов*. – М., ИГКЭ, ИГ РАН, 2020, с. 229—233.
13. *Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: Р 2.1.10.1920-04*. – Утв. глав. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 5 марта 2004 г.; введ. 5 марта 2004 г. – М.: Федер. центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 340 с.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

14. Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами / Под ред. д-ра геогр. наук, проф. Н. В. Кобышевой. – СПб., 2008, 336 с.

15. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. – СПб.: Научно-технические технологии, 2022, 676 с.

16. Air Toxics Hot Spots Program, 2008: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. U.S. EPA, California, 131 p.

17. Air Toxics Hot Spots Program, 2015: Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. U.S. EPA, California, 231 p.

18. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland, 2014,

19. Emelina S.V., Konstantinov P.N. et al. Evaluation of the informativeness of several biometeorological indices for three areas of the European part of Russia. – Russ. Meteorol. Hydrol., 2014, vol. 39, pp. 448–457; DOI: 10.3103/S1068373914070036.

20. Integrated Risk Information System (IRIS) Database. U.S. EPA. Available at: <http://www.epa.gov/IRIS/>.

21. Makosko A.A., Matesheva A.V. Assessment of the effect of long-range transport on air pollution trends for different Russian regions. – IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020, vol. 606, 012034; DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012034.

22. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrodynamics and chemistry. – Izv. Atmos. Ocean. Phys., 2015, vol. 51, pp. 311–319; DOI: 10.1134/S0001433815030093.

23. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Lab. Available at: <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.

24. Van Vuuren D.P., Kriegler E., O'Neill B.C. et al. A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture. – Climatic Change, 2014, vol. 122, pp. 373–386.

25. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. 1.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.

26. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. 1.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КРИОЛИТОЗОНУ ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А.В. Кислов*, С.А. Огородов, Н.Н. Шабанова, С.А. Мысленков

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

**avkislov@mail.ru*

Аннотация. Экологические условия Арктики уязвимы к последствиям изменения климата. Целью данного исследования является анализ изменений, происходящих в криолитозоне побережья российской Арктики, инициированных изменениями климата. Для этой цели использовались модели данных CMIP6 со сценарием изменения климата SSP5-8.5. Изменение климата вызывает изменения в арктической среде, в первую очередь за счет деградации вечной мерзлоты, что приводит к важным изменениям в таких явлениях, как селевые потоки, криогенные оползни, абразия, эрозия, суффозия, морозное пучение, солифлюкция, термокарст, термоабразия и другие. В некоторых случаях интенсивность и площадь этих процессов увеличиваются, например, к 2050 году активизируются процессы пучения и термокарста. В других случаях ожидается затухание процессов солифлюкции в южной части ЯНАО. Прогнозируемые климатические изменения неизбежно приведут к перестройке геосистем ЯНАО, создав риски для инфраструктуры экономически активных территорий.

Ключевые слова: потепление Арктики, экзогенные процессы, нестационарные экстремумы, термоабразия

Введение

Потепление климата в Арктике происходит более интенсивно, чем в любом другом регионе Земного шара. Рост температур, проявляющийся и в годовом, и в сезонном масштабе называют «Арктическим ускорением» (Serreze, Barry, 2011). Он непосредственно обусловлен усилением адвекции тепла в атмосфере (Cohen et al, 2014; Ye et al, 2015) и «Атлантизацией Арктики» за счет активизации процессов перемешивания в верхних слоях Северного Ледовитого океана с выходом к поверхности заглубленной теплой атлантической воды (Polyakov et al, 2017), происходящих с важным воздействием ряда механизмов обратных связей тем-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

пературы и морского льда (Screen, Simmonds, 2010; Chemke et al. 2021). Вместе с потеплением происходят изменения циркуляции атмосферы и режима осадков (Кислов и др., 2021; Kislov et al, 2021; Суркова, Крылов, 2016).

Изменения климата играют большую роль именно в Арктике потому, что они проявляются здесь с большой амплитудой в широком спектре природных явлений из-за активизации экзогенных процессов, определяемой тем, что при типичном для летней Арктики термическом режиме вблизи 0° С, потепление приводит к интенсификации таяния льдов, входящих в состав многолетнемерзлых пород. Это обеспечивает разнообразные воздействия на структуру и свойства земной поверхности, проявляющиеся за счет таких механизмов, как криогенные оползни, абразия и термоабразия, суффозия, эрозия, солифлюкция, пучение и др. В горных районах потепление и изменение режима осадков влечет к изменениям статистических характеристик лавин и водоснежных потоков. Все это создает усиление опасных явлений, усиливается риск ландшафтной перестройки геосистем и в целом приводит к таким последствиям, к которым должны быть готовы строительный комплекс, транспорт, добывающая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство, и др. (Общее резюме, 2022; IPCC_AR6 SYR_LongerReport PDF (report.ipcc.ch)).

В связи с этим возникает проблема прогноза происходящих изменений. При этом приходится решать две главные задачи. Первая – это прогноз изменений климата в определенном регионе. Вторая – определение реакции окружающей среды на эти изменения, выраженная вариациями тех механизмов, которые перечислены выше, расчет которой базируется на климатическом прогнозе и требует детализированной информации о свойствах грунтов.

Для прогнозирования климата на середину и конец 21 века традиционно используется набор моделей климата, работающих в соответствии с регламентом СМIP. Они представляют собой воплощение последних достижений теории климата, гидродинамики, вычислительной математики и компьютерных технологий. Модели прошли процедуру валидации, то есть была продемонстрирована способность правильно (до определенной степени) воспроизводить состояние климата, соответствующее набору внешних факторов. В качестве эталонов, с которыми производится сравнение, применяется современный климат, различные срезы и отрезки истории климатов прошлого, по которым накоплен архив палеореконструкций. Также выполнена проверка некоторых специальных эффектов, для которых существуют известные теоретические представления.

С другой стороны, как только что отмечено, валидация не показала, что модели всесторонне воспроизводят особенности климатического режима. Более того, можно утверждать, что только температура воздуха и, в гораздо меньше степени, атмосферные осадки могут быть использованы для прикладных расчетов. Далеко не полно воссоздаются в компьютерном эксперименте экстремальные значения. Наконец, климатические модели, даже в случае применения одного и того же набора внешних параметров, показывают несколько разные результаты моделирования, что связано с особенностями их внутренней динамики. Сопостав-

ление сигнала глобального потепления с этим модельным шумом служит для оценки статистической значимости данного сигнала. Поэтому прямым путем трудно рассчитывать получить представления об изменениях статистики экстремальных значений, поскольку модели достаточно грубого разрешения воспроизводят экстремальные режимы далеко неполно.

Получить прогноз статистических характеристик в условиях изменений климата сложно еще и потому, что традиционно используемые методы теории вероятностей основаны на предположении стационарности. Следовательно, требуется распространить теорию экстремальных значений на случай нестационарности. Если сузить эту задачу, формально рассматривая только необходимость подбора кривой функции распределения вероятностей (ФРВ) для нестационарного ряда, то решение такой задачи может быть достигнуто переходом к ФРВ с большим числом параметров, в том числе, к аппроксимации эмпирической ФРВ смесью нескольких теоретических моделей функций распределения.

Такой подход, оказывается, можно реализовать, используя в условиях нестационарности те же ФРВ, которые возникают в теории экстремальных значений (Coles, 2001). При этом прагматически допускается, что один или несколько параметров ФРВ выражаются как функции времени (Coles 2001; Katz, 2013). Другими словами, в любой момент времени по-прежнему будет использоваться известное распределение, но со временем его параметры будут меняться. В этом ограниченном смысле статистическая модель остается интерпретируемой с точки зрения изменений экстремальных значений. Увеличение (по сравнению с стационарным случаем) числа параметров, требующихся для описания изменения параметров ФРВ, не представляет собой, по крайней мере формально, сложностей, поскольку такого рода статистические модели легко адаптировать для применения метода максимального правдоподобия.

Однако применение такой методологии для прогноза будущего состояния климата не может быть эффективно потому, что зависимости параметров распределения от времени будут априорны. Поэтому для задачи именно климатического прогноза следует предложить иные подходы, принимая во внимание то, что он осуществляется с помощью моделирования климата в рамках моделей Земной системы и использовать свойства (достоинства и недостатки) модельных полей.

Для решения второй задачи требуется иметь набор предметно-ориентированных моделей, позволяющих, используя детализированные представления о свойствах грунтов, использовать данные климатического прогноза для расчета реакции окружающей среды на прогнозируемые изменения климата.

Современное потепление в Арктике проявляется в целом спектре природных экзогенных процессов. Ключевыми из них являются криогенные процессы, так как именно наличие и состояние мерзлоты определяют остальные природные характеристики: рельеф, растительность, увлажненность и так далее. Поэтому прогноз и моделирование природных процессов в Арктике связаны, в первую очередь, с моделированием состояния мерзлоты: многолетней и сезонной. В условиях потепления климата меняется мощность сезонно-талого слоя, устой-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

чивость пород, в том числе и на берегах. Это обеспечивает разнообразные воздействия на структуру и свойства земной поверхности, проявляющиеся за счет таких механизмов, как криогенные оползни, термоабразия, суффозия, эрозия, пучение и др.

Наиболее сложные и динамичные процессы наблюдаются на стыке литосферы, атмосферы, гидросферы и криосферы – на арктических берегах, сложенных многолетнемерзлыми дисперсными грунтами, где наряду с типичными для умеренных и тропических широт береговыми процессами развита термоабразия (рис. 1).



Рис. 1. Типичный термоабразионный берег Карского моря

Термоабразия – процесс разрушения берега и подводного склона, сложенных многолетнемерзлыми дисперсными породами в результате волнового и термического воздействия (Арэ, 1980). Около трети от протяженности береговой линии морей Российской Арктики подвержено различным формам термоабразионного процесса, при этом среднемноголетние скорости абразии берегового уступа могут достигать 0,5-5,0 м/год. Одновременно с отступанием берега происходит оттаивание мерзлоты и увеличение глубин на подводном склоне (Overduin, 2016). В итоге опасности обрушения в море могут стать подвержены инженерные сооружения, расположенные в непосредственной близости от берегового уступа, а оголившиеся в процессе термоабразии подводные трубопроводы и кабели связи, пересекающие береговую черту, могут подвергнуться ледовым воздействиям. Проблема усугубляется заметным ускорением отступления термоабразионных берегов в последние десятилетия на фоне потепления климата, снижения ледовитости и техногенных нарушений. Для достоверного прогноза динамики берегов представляется важным определить изменчивость вклада основных гидрометеорологических драйверов в процесс разрушения термоабразионных берегов арктических морей России на фоне климатических изменений в прошлом и настоящем. На основании анализа гидрометеорологического потенциала дина-

мики термоабразионных берегов во второй половине XX – начале XXI века, их геоморфологического и геокриологического строения, данных мониторинга на ключевых участках освоения и при помощи физико-математического моделирования получена оценка современной динамики термоабразионных берегов в условиях изменения климата и ледовитости (Shabanova et al., 2018).

Метод расчета нестационарных статистических характеристик при изменениях климата

Воздействие климатических изменений проявляется во всем высокоширотном регионе, однако в каждом регионе есть свое своеобразие. Мы сфокусируем внимание на условиях Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), территория которого располагается вокруг пересечения 70° с.ш. и 70° в.д., включает три больших полуострова: Тазовский, Ямал и Гыдан и покрыта тундрой и северной тайгой. Здесь располагается около 300 тысяч озер. В западной части в ЯНАО частично входит горная система Полярного Урала. Доминантной особенностью географии является р. Обь, впадающая в Карское море через специфический залив Обская Губа. Климатические особенности ЯНАО определяются его высокоширотным расположением, и совместным влиянием Атлантического океана, континентальности Сибири и воздействия Карского моря, покрытого льдом большую часть года [7].

Для анализа использованы данные о среднемесячных температурах и суточных суммах осадков за период 1966 – 2018 гг., полученные на станциях ЯНАО (см. табл. 1), а также на станциях достаточно близкого окружения.

Табл. 1. Метеорологические станции на территории ЯНАО (<http://meteo.ru/>, accessed on 1 January 2020).

станции	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.
Станция им. Попова	73°19'	70°3'
Марресале	69°42'	66°48'
Антипаюта	69°06'	76°51'
Тазовск	67°26'	78°42'
Салехард	66°32'	66°38'
Новый Порт	67°41'	72°53'
Ныда	66°36'	72°55'
Надым	65°32'	72°31'
Тарко-Сале	64°55'	77°46'
Халасавей	63°23'	78°19'
Толка	64°00'	82°03'

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Результаты моделирования климата представлены данными 42 моделей CMIP6 [20] для периода 2015 – 2065 гг., которые были интерполированы на сетку $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы и усреднены между всеми моделями. Такое грубое разрешение уместно для сравнительно однородной территории ЯНАО, к тому же пространственный шаг в использованных моделях CMIP6 (менявшийся от $0,94^\circ \times 0,94^\circ$ до $3,75^\circ \times 2,25^\circ$ широты и долготы) не позволяет применить более детальное разрешение. Для расчета прогностических значений, сперва определялась модельная аномалия между прогнозным периодом середины 21 века 2035–2065 гг., который соотносится с «серединой 21 века», и базовым периодом, за который приняты данные 2015–2025 гг. Затем эта величина прибавлялась к соответствующему значению современных осадков и температуры, известным наблюдениям или по реанализу ERA5 [5].

Рассмотрим результаты прогноза, осуществленные по методике, описанной в конце прошлого раздела, с точки зрения статистической значимости результатов. Для этой цели проверяется нулевая гипотеза (с использованием t – теста) о равенстве средних значений температуры (осадков) в современном климате и в условиях середины 21 века (в среднем по всем моделям). В результате расчетов оказалось, что в каждой точке сетки $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы межмодельный разброс (определяющий дисперсию) настолько велик, что отказаться от нулевой гипотезы нет оснований. Это означает, что зафиксировать изменения климата невозможно, несмотря на то, что потепление дает каждая модель. В этом, достаточно типичном для статистических расчетов случае, для спасения ситуации используется представление о том, что изменение климата на однородной территории имеет достаточно гладкое распределение, что позволяет одновременно рассмотреть изменения на значительной площади (по образному выражению, происходит «заимствование сил» пространства для надежного установления временных тенденций (Katz, 2013)). При таком подходе действительно, получилось, что для всей территории ЯНАО нулевая гипотеза может быть отвергнута как для изменений температуры, так и для осадков (кроме осадков теплого сезона) в пользу альтернативной гипотезы. Отметим, что из примерно 400 узлов сетки, покрывающей ЯНАО, для пространственного обобщения взяли около 100 узлов разреженной сетки, чтобы избежать статистически зависимых эффектов.

В результате получено, что в середине столетия на территории ЯНАО январь будет теплее на $3,5^\circ \text{C}$ (на побережье даже на $4,5^\circ \text{C}$). Потепление в июле составит $2,5^\circ \text{C}$ повсеместно. Осадки в январе вырастут на 10% и останутся статистически неизменными в июле.

Для характеристики будущего климата и управления рисками, недостаточно иметь данные только о фоновом сдвиге. Требуется информация и о изменении экстремальных показателей. Для их прогноза, как отмечено во Введении, непродуктивно использовать модельные данные в чистом виде, поскольку модели, как правило, занижают экстремальные значения. Поэтому использовать теоретические подходы, рассмотренные в Введении в чистом виде невозможно, поскольку для этого потребовалось бы задавать будущий временной ход параметров ФРВ.

Для решения проблемы авторы пошли по следующему пути. Было обнаружено, что динамика температуры и осадков на всех станциях очень хорошо описывается ФРВ Гаусса и Вейбулла, соответственно. Это доказывает, что ФРВ как в теплых, так и в холодных условиях (в пределах ЯНАО и окружающей территории) имеет одинаковое распределение. Применим этот вывод (фактически, снова заимствуя пространственную информацию для обоснования временных закономерностей) для представления о том, что в будущем теплом климате вид ФРВ сохранится. Отметим, что эта позиция принимается всеми авторами, исследующими нестационарные ФРВ. Тогда остается задача определения параметров ФРВ, отличающихся в будущем климате от современных значений.

В самом деле, рассмотрим для примера ФРВ для осадков (Pr), используя ФРВ Вейбулла

$$F(Pr) = 1 - \exp[-A(Pr)^k]$$

Перепишем эту зависимость в удобном виде специальных координат, в которых процедура использования метода наименьших квадратов (как практического средства реализации принципа максимального правдоподобия) наиболее наглядна, поскольку ФРВ Вейбулла запишется в форме

$$\ln\{-\ln[1 - F]\} = k \ln[Pr] + \ln[A].$$

Данное выражение свидетельствует, что если эмпирические значения укладываются на отрезок прямой, то это говорит о том, что эмпирическая ФРВ соответствует модели ФРВ Вейбулла. Чтобы оценить точность аппроксимации применяется коэффициент детерминации (R^2).

На рис. 2 построены таким способом 11 аппроксимаций эмпирических ФРВ, по данным станций ЯНАО (см. табл.1), спрямленных в координатах Вейбулла. Получившиеся отрезки прямых имеют разный наклон и сдвинуты относительно друг друга (что отражает различия в климатических условиях разных станций), но R^2 всюду очень близок к единице.

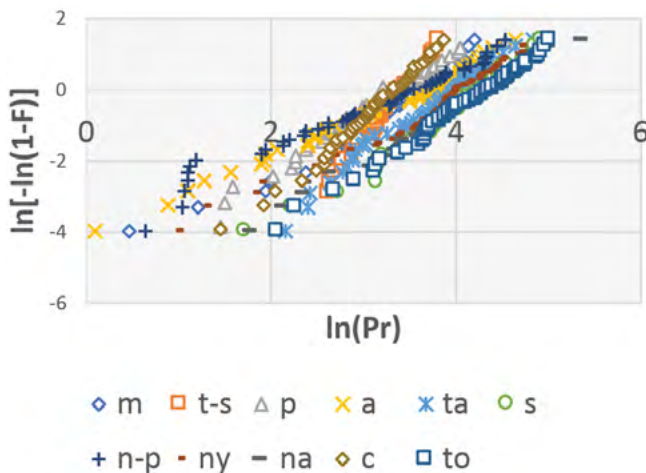


Рис. 2. Эмпирические ФРВ месячных значений осадков (станционные измерения, июль), спрямленные в координатах распределения Вейбулла. Качество линейной регрессии характеризуется во всех случаях $R^2 > 0,96$.

Обозначения:

- m – Маррессале,
- t-s – Тарко-Сале,
- p – станция имени Попова,
- a – Антипаюта,
- ta – Тазовск,
- s – Сплехард,
- n-p – Новый Порт,
- ny – Ныда,
- na – Надым, Халасавей,
- to – Толка

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Переходя к проблеме определения модифицированной из-за изменений климата ФРВ, вновь отметим, что прямой путь использования данных моделирования температуры или осадков неэффективен из-за того, что экстремумы плохо воспроизводятся в численном эксперименте. Поэтому, чтобы рассчитать трансформацию ФРВ разумнее использовать те статистические характеристики, которые определяются кумулятивным поведением случайных величин всей модельной выборки. К такого рода показателям относятся: среднее значение, стандартное отклонение, медиана и мода, зная которые можно рассчитать параметры ФРВ. Первые две величины определяют вид гауссовой кривой нормального распределения вероятностей. Пример трансформированной таким образом ФРВ дан на рис. 3.

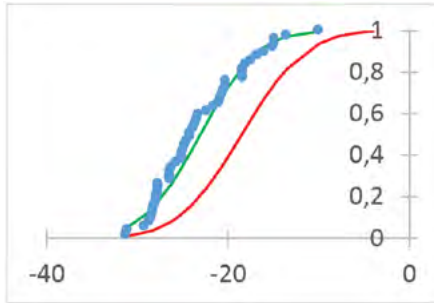


Рис. 3. Функция распределения вероятностей температуры января по данным измерений на станции им. Попова (точки), их аппроксимация гауссовой кривой, а также гауссова кривая для измененного климата на середину 21 века

Реализуя гипотезу о сохранении вида ФРВ, определим для вариаций осадков параметры функции Вейбулла (A, k), используя моду (Mo) и медиану (Me), определенные по данным моделирования:

$$Mo = (Ak)^{-1/k}(k - 1)^{1/k}$$

$$Me = (A)^{-1/k}(\ln 2)^{1/k}$$

Решая систему уравнений, получаем параметры A и k . Пример модифицированной под влиянием изменений климата ФРВ дан на рис.4.

Представление о том, что в будущем климате вид ФРВ остается неизменным,

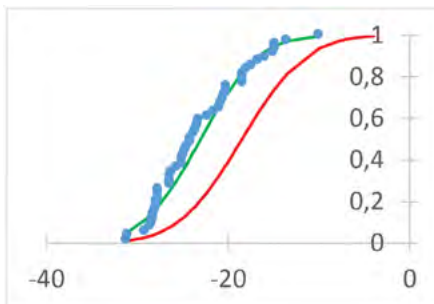


Рис. 4. Функция распределения вероятностей месячных сумм осадков января по данным измерений на станции им. Попова (точки), их аппроксимация кривой вейбулловского распределения, а также вейбулловская кривая для измененного климата на середину 21 века

а речь идет только о меняющихся параметрах (своих для разных моментов времени) должно иметь гораздо более глубокое физическое обоснование, чем представления, использованные в [Cole] по формальным математическим причинам.

Речь идет о гипотезе, что в будущем климате изменения не коснутся принципиальной структуры организации процессов, приводящих всегда к одному и тому же виду распределения. На самом деле, это никем не доказано, и из общих соображений можно ожидать, например, что ФРВ экстремальных процессов, оставаясь в рамках GEV, перейдет из Вейбулловского распределения в ФРВ Фреше или Гумбеля. Однако такого рода исследования находятся за пределами задач, стоящих в данной статье.

Расчеты квантильных значений в нестационарных условиях

Развитая методология определения трансформированных за счет изменений климата ФРВ была применена для определения изменений статистических показателей экстремумов. Для этой цели выполнен расчет квантильных значений. Их использование представляется лучше интерпретируемым, чем традиционные представления о среднем периоде повторения экстремума, поскольку этот показатель может быть нарушен нестационарностью. Квантильные значения для температуры и осадков для гауссова и вейбулловского распределений выражаются, соответственно:

$$T(p) = m + \sigma\sqrt{2}(\text{erf})^{-1}(2p - 1)$$

$$\text{Pr}(p) = \left(\frac{1}{A} \ln \frac{1}{1-p}\right)^{1/k},$$

где m и σ – математическое ожидание и стандартное отклонение, (erf) – функция ошибок.

Для рассматриваемых станций ЯНАО получены результаты (см. табл. 2 и 3).

Табл. 2. Квантильные значения температуры $T(0,05)$ и $T(0,95)$, оС, для середины 21 века (числитель) и периода наблюдений 1966 – 2018 гг. (знаменатель)

Станции	январь		июль	
	$T(0,05)$	$T(0,95)$	$T(0,05)$	$T(0,95)$
Станция им. Попова	-28/-31	-9/-15	3/2	11/8
Марресале	-26/-30	-8/-13	5/3	15/12
Антипаюта	-32/-35	-14/-19	9/7	19/16
Тазовск	-32/-35	-14/-18	13/11	21/18
Салехард	-28/-31	-13/-17	13/11	21/18
Новый Порт	-29/-32	-12/-17	10/8	19/16
Ныда	-29/-32	-12/-16	13/11	21/17

Изменения климата:**причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования**

Окончание таблицы 2

Станции	январь		июль	
	T(0,05)	T(0,95)	T(0,05)	T(0,95)
Надым	-29/-32	-11/-15	14/12	22/20
Тарко-Сале	-31/-34	-12/-16	15/13	23/20
Халасавей	-30/-33	-11/-15	15/13	23/20
Толка	-32/-34	-12/-16	15/13	23/20

Табл. 3. Квантильные значения осадков Pr(0,95), мм, для середины 21 века (числитель) и периода наблюдений 1966 – 2018 гг. (знаменатель), а также относительные изменения, %

Станции	январь		июль	
		%		%
Станция им. Попова	34 / 47	29	55 / 68	19
Марресале	35 / 45	22	64 / 76	16
Антипаюта	28 / 43	42	101 / 98	3
Тазовск	63 / 77	18	95 / 91	4
Салехард	35 / 49	29	133 / 146	-9
Новый Порт	37 / 58	33	91 / 100	-9
Ныда	38 / 52	27	130 / 148	-12
Надым	40 / 57	30	154 / 173	-11
Тарко-Сале	45 / 55	18	117 / 135	-13
Халасавей	45 / 56	20	126 / 146	-14
Толка	51 / 64	20	145 / 162	-11

Данные табл. 2 показывают, что в январе потепление климата привело к сдвигу ФРВ вправо, однако, если T(0,05) увеличилась примерно на 3 °С, то T(0,95) возрастают на 4-5°С. Аналогично несимметричный сдвиг ФРВ происходит и в июле: «самые холодные» значения растут на 2°С, а «самые теплые» примерно на 3°С. Несмотря на то, что расчеты проведены для каждой станции, результат получился практически однородный по всему региону.

Экстремальные осадки зимой увеличиваются на 20-40% (см. табл. 3). Вместе с потеплением это свидетельство того, что проникновение циклонов с запада станет более частым явлением, чем в нынешних условиях. Летом осадки возрастают в северной части региона, а в южной части уменьшаются (~10%). Вместе с потеплением это создает угрозу учащения природных пожаров.

Прогноз некоторых геокриологических показателей для территории Ямало-Ненецкого автономного округа

Оценки параметров изменения окружающей среды, вызванных изменением климата, были основаны на прогнозируемых модельных данных о температуре и осадках с использованием простых алгоритмов расчетов специфических показателей. Использование сложных схем непродуктивно из-за значительных неопределенностей, связанных как с прогнозом климата, так и с недостоверностью информации о пространственных и временных характеристиках грунтов.

Изменение климата вызывает изменения в арктической среде, прежде всего, за счет деградации вечной мерзлоты, которая чувствительна к изменению температуры воздуха и осадков, что приводит к изменению активности некоторых экзогенных процессов.

Для территории ЯНАО перечень и прогноз вариаций геокриологических явлений и эффектов достаточно подробно изложен в (Kislov et al, 2023). Остановимся на некоторых ключевых выводах.

В ряде случаев интенсивность и площадь ряда процессов увеличиваются, например, так процессы пучения и термокарст становятся более активными к 2050 году в связи с повышением температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания. В других случаях процессы, связанные с преобразованием вечной мерзлоты, могут затухать из-за ее полного или частичного исчезновения, как в таежной зоне южнее, где процессы растворения затухают из-за прерывистого или спорадического распространения вечной мерзлоты. Процессы, для которых динамика вечной мерзлоты не имеет решающего значения, протекают гораздо медленнее. Например, характер карстового процесса менее чувствителен к изменению климата, поэтому существенного изменения карстовых процессов к середине XXI века ожидать нельзя. На основе анализа метеорологических данных установлено, что к 2050 году активность карстовых процессов и связанные с ними риски практически не изменятся по сравнению с современным состоянием.

Рассмотрим некоторые эффекты более детально. Так, оползни (представляющие собой скользящее смещение горных пород вниз по склону) вне зоны распространения многолетнемёрзлых пород возникают на крутых склонах с наклоном 15° и более (Леонтьев, Рычагов, 1979), а в криолитозоне для их развития достаточно уклона в 4-6° (Ramage et al, 2017).

На основании данных о плотности распространения термоцирков и результатов климатических прогнозов были выделены участки повышенного риска активизации криогенного оползания на середину XXI века. К ним относятся участки на Западном Ямале в районе Бованенковского месторождения и участки в 100-км полосе на севере Гыдана, включающей Гыданскую гряду и территории к северу от неё.

Суффозионные процессы (механическое разрушение и вынос мелких частиц из грунтов потоком вод) могут в разной степени проявляться на территории ЯНАО. В области сплошного распространения мерзлоты в Ямальском, Тазов-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ском административных районах и на севере Надымского, Пуровского и Приуральского районов, риски развития суффозионных процессов при изменении климата носят локальный характер, ввиду приуроченности данного процесса к оттаивающим грунтам.

В центральной и южных областях Пуровского района, как и в восточной части Надымского района и западной части Красноселькупского района в связи с более пологим рельефом и, как следствие, заболоченными участками, при изменении климата суффозионные процессы будут маловероятны, и могут проявиться лишь на участках с песчаными и супесчаными породами, подверженными размыванию при увеличении количества выпадающих осадков.

Эрозионные процессы в настоящее время на территории ЯНАО развиты повсеместно, но с различной интенсивностью. Пуровский, Красноселькупский и южная часть Надымского административных округов расположены в области прерывистого или островного распространения многолетнемерзлых пород, поэтому изменения климата не так сильно будут влиять на термоэрозионные процессы.

Термокарст на территории ЯНАО развит повсеместно. Современные исследования динамики термокартовых озер показывают сокращение заозеренности территории за счет спуска крупных озер на Ямале, но при росте числа мелких озер. В северных районах со сплошным распространением мерзлоты и наличием сильнольдистых грунтов повышение температуры и увеличение осадков будет увеличивать риски развития термокарстовых процессов. Ввиду увеличения числа мелких термокарстовых западин области Ямальского, севера и юго-запада Гыданского, Пуровского и западной части Красноселькупского административных районов отмечены как весьма опасные районы.

Солифлюкционные процессы на территории ЯНАО активизируются в летний период, и приурочены к районам распространения многолетнемерзлых пород, особенно явно в настоящее время проявляются в центральной части полуострова Ямал и Гыдан, северной части Тазовского полуострова (в зоне средней тундры). Подвержены солифлюкционным процессам берега Байдарацкой и севера Обской губы и в целом Карского моря. Потепление вызовет увеличение мощности сезонно-талого слоя, поэтому будет усиливать солифлюкционный процесс.

Пучение грунта – опасный геоморфологический процесс, связанный с образованием бугров пучения – положительных форм с ледяным ядром, возникающих в результате неравномерного промерзания и льдообразования в дисперсных отложениях. Бугры пучения образуются в районах, сложенных многолетнемерзлыми породами, как в пределах сплошного, так и в пределах островного распространения многолетней мерзлоты. К середине 21 века в результате повышения температуры воздуха и деградации многолетней мерзлоты процессы пучения станут более активными.

В ряду экзогенных процессов, чувствительным элементом у которых является комплекс многолетнемерзлых пород, является термоабразия. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Термоабразия

Как уже было отмечено выше, термоабразия – термомеханический процесс, где основными движущими факторами являются термическое и волновое воздействия. Термическое воздействие выражается в передаче энергии к мерзлым породам, слагающим берега, в результате контакта с воздухом и водой, температура которых выше, чем температура мерзлых пород. Соответственно, чем выше температура воздуха и воды, и чем дольше продолжительность периода с положительными температурами воздуха и контакта с морской водой, температура которой выше нуля, тем заметнее влияние термического фактора на динамику берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, тем активнее термоденудация и термоабразия. Волновое воздействие проявляется в процессе прямой механической абразии берега и определяется как интенсивностью, так и продолжительностью штормовых волнений [Огородов, 2008]. Ускорение разрушения термоабразионных берегов за счет термического фактора происходит вследствие более интенсивного оттаивания мерзлых грунтов под действием более высоких температур воздуха и воды, увеличения количества осадков; ускорение разрушения берегов за счет волно-энергетического фактора имеет место в результате усиления волнового воздействия на берег и, в меньшей степени, повышения уровня моря. Рост температур способствует деградации ледяного покрова, при этом продолжительность безледного периода увеличивается. Сокращение площади морских льдов ведет к увеличению длины разгона ветровых волн, доминирующих в арктическом бассейне. В результате усиливается воздействие волн на берег, что, несомненно, сказывается на динамике берегов, приводя к ускорению их отступления береговой линии (Огородов, 2011).

Для расчетов гидрометеорологического потенциала динамики берегов ключевых участков были собраны и обработаны исходные гидрометеорологические данные, в том числе, данные наблюдений на ГМС и реанализа, необходимые для вычисления волновых энергетических характеристик береговой зоны в конце XX – начале XXI веков. Для всей территории Российской Арктики получены данные об изменении температуры воздуха, индекса таяния, продолжительности безледного периода и характеристик ветра в XX–XXI веке, проанализирована их временная и пространственная изменчивость. Суммарное механическое воздействие волн на берег в период открытой воды существенно отличается в разные годы в зависимости от интенсивности и продолжительности штормовых нагонов. Интенсивность штормовых нагонов, в свою очередь, зависит как от скорости ветра, так и от длины разгона волн, который определяется размером полыньи и, соответственно, в процессе ее расширения энергия волн (при неизменной скорости ветра) и их воздействие на берег будут расти. Расчет изменчивости гидрометеорологического потенциала термоабразии позволил получить ретроспективную оценку влияния изменения климата и ледовитости на термоабразию морских берегов Российской Арктики (Огородов и др., 2022).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Для расчета термического потенциала разрушения берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, использованы данные наблюдений о среднесуточной температуре воздуха с гидрометеорологических станций (ГМС), ближайших к ключевым участкам. Архивы высокого качества доступны для большого числа арктических станций, поэтому им было отдано предпочтение перед данными реанализов (Shabanova et al., 2018).

Для оценки влияния термической составляющей были рассчитаны индексы таяния и замерзания (air thawing и air freezing index) (Andersland, Ladanyi, 2004), представляющие собой накопленную сумму среднесуточных температур теплового и холодного периодов соответственно. Накопленные величины отражают сумму энергии, переданную берегу из окружающей среды (или отнятой у него в случае отрицательных температур), поэтому они лучше подходят для анализа теплового воздействия на арктические берега. Ежегодные суммы положительных температур для 10 станций были получены на основе данных реанализа ERA-5 (Hersbach et al., 2020). Для данных ближайших к положению станций модельных данных ERA-5 по данным часового разрешения были получены сначала среднесуточные значения, а затем рассчитаны суммы положительных температур за год в градусоднях (рис. 5).

Везде в Арктике эта величина растет. Коэффициенты трендов составляют 62 (Лаврентия) – 162 (Ходовариха) °C-дней/10 лет или 105°C-дней/10 лет в среднем по 24 пунктам. Это соответствует 7–28%/10 лет (19%/10 лет в среднем по 24 пунктам) от среднемноголетнего значения It. Все эти тренды значимы на уровне значимости 0.01. Для о-ва Ушакова и Северной Земли ситуация отличается от описанной выше: на о-ве Ушакова изменения статистически не обнаруживаются (наблюдается слабо отрицательный незначимый тренд).

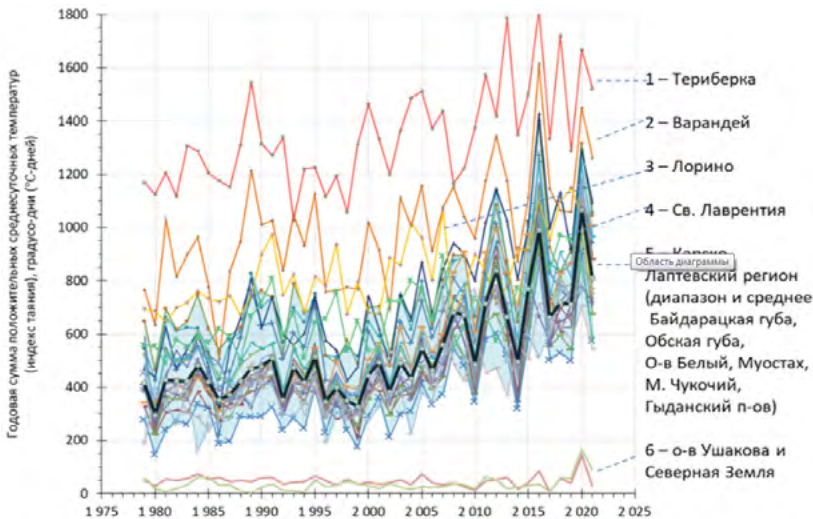


Рис. 5. Годовая сумма положительных среднесуточных температур воздуха (индекса таяния) для различных участков российской Арктики от Баренцева до Берингова моря по данным ERA5

Температура воздуха тесно связана с другой важной для динамики берегов характеристикой – безлёдным периодом. Продолжительность безледного периода определяет размер полыньи и, следовательно, длину разгона волн. Глобальное потепление климата приводит как к росту локальных температур, так и смещению сроков появления и схода льда. С другой стороны, сокращение сроков пребывания льда на местности приводит к дополнительному повышению температур воздуха в связи с отсутствием «охладителя» в виде ледяного покрова. Продолжительность безлёдного периода увеличилась для всех исследованных пунктов со скоростью 7 – 25 дней/10 лет (в среднем для 23 пунктов – на 13 дней/10лет) или на 7-19%/10 лет относительно среднемноголетней продолжительности безлёдного периода. С учётом того, что СКО рядов составляет 17 – 45 дней (в среднем 25), то за 40 лет приращение продолжительности безлёдного периода составляет 2 – 2,5 СКО. Характерно, что участки берега в открытом море могут испытывать большую интенсификацию ветро-волнового воздействия в условиях потепления климата, чем участки в заливах и губах, где продолжительность безлёдного периода увеличивается не так быстро, как в открытом море, за счёт распресняющего действия речных вод. Межгодовая изменчивость продолжительности безлёдного периода представлена на рис. 6. При прочих равных гидрометеорологических условиях продолжительность безледного периода определяет вероятность событий экстремальных штормовых нагонов, являющихся ведущим фактором динамики берега и конечной трансформации его профиля. Без периодического волнового воздействия удаления наносов, поступающих к подножью берегового уступа с термоденудацией, не происходило бы и берег со временем стабилизировался.

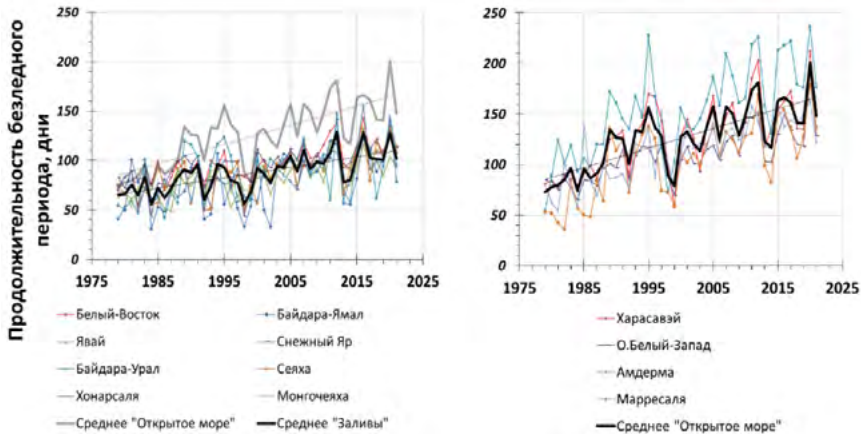


Рис. 6. Продолжительность безлёдного периода на различных участках российской Арктики по данным NSIDC для заливов и губ (слева) и открытых участков берега (справа)

На текущий момент нигде в мире не существует регулярной сети мониторинга береговых арктических процессов, интегрированной с известными волновыми моделями, описывающими трансформацию рельефа береговой зоны в результате шторма. В некоторых странах Европы в целях прогноза береговых явлений (зато-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

плений или обрушений берега) национальные гидрометеорологические службы осуществляют регулярные (на масштабах суток) наблюдения береговой линии в режиме реального времени. Используя эти наблюдения, они корректируют входящие данные каскада оперативных численных моделей отступления берегов, основанных на гидродинамических законах, таких как SWAN (модель волнения), MIKE (модель уровня моря), xBeach (модель транспорта наносов и высоты берега) (Jamal, 2014). Сюда также подключаются модели течений и приливов (в случае приливного берега). Однако в Арктике эти модели могут быть только ограниченно применены на некоторых участках в период окончания теплого сезона, когда период активного таяния мерзлоты можно считать завершенным. Пример такого применения – работа Kulkarni, 2013. В общем случае также они не могут быть применены, так как они не содержат блок, описывающий процессы, связанные с таянием и образованием мерзлоты. Интегрирование мерзлотного блока в существующие гидродинамические численные модели – одна из ключевых задач моделирования и прогноза природных процессов в Арктике, которую еще только предстоит решить. В этой связи для оценки волно-энергетического потенциала термоабразии берегов мы использовали ветроэнергетический метод Попова-Совершаева (Попов, Совершаев, 1981, 1982), модифицированной для расчета сезонной и межгодовой изменчивости энергии ветровых волн (Shabanova et al., 2018), приходящих на внешнюю границу береговой зоны.

Для отдельных ключевых участков западного сектора российской Арктики волноэнергетический потенциал за последние 40 лет увеличился в 1,5 раза, что связано в первую очередь с увеличением продолжительности безледного периода (рис. 7). Характерно, что участки берега в открытом море могут испытывать большую интенсификацию ветро-волнового воздействия в условиях потепления климата, чем участки в заливах и губах, где продолжительность безледного периода увеличивается не так быстро, как в открытом море, за счёт распресняющего действия речных вод. В заливах и губах продолжительность безледного периода возросла незначительно по сравнению с открытыми к морскому волнению участкам.

Суммарное механическое воздействие волн на берег в период открытой воды существенно отличается в разные годы в зависимости от интенсивности и продолжительности штормовых нагонов. Интенсивность штормовых нагонов, в свою очередь, зависит как от скорости ветра, так и от длины разгона волн, который определяется размером полыньи и, соответственно, в процессе ее расширения энергия волн (при неизменной скорости ветра) и их воздействие на берег будут расти. Расчет изменчивости гидрометеорологического потенциала термоабразии позволил получить ретроспективную оценку влияния изменения климата и ледовитости на термоабразию морских берегов Российской Арктики (Огородов и др., 2022). Несмотря на то, что волноэнергетический потенциал возрос существенно и статистически значимо, эта величина может сильно меняться от года к году в зависимости от количества и силы штормов. При этом термический потенциал динамики берегов возрос гораздо более существенно. последние годы полевые исследования выявили стабилизацию и изменение характера отступления берегов.

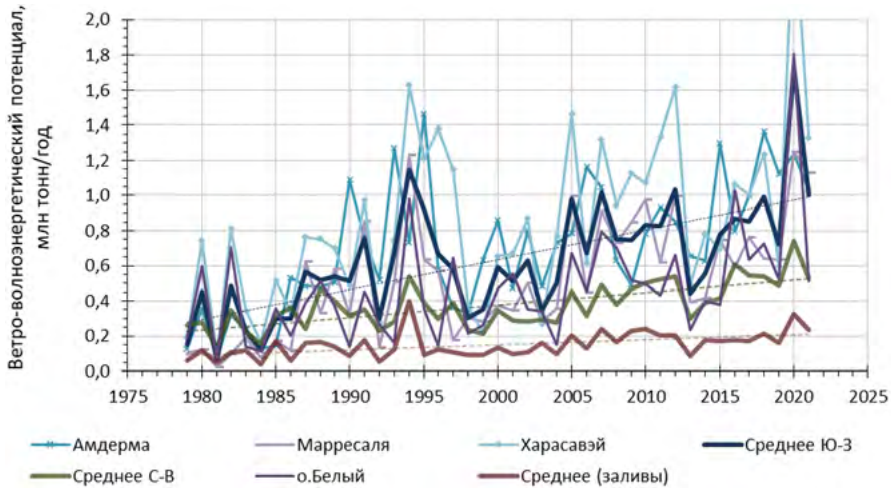


Рис. 7. Ветро-волноэнергетический потенциал разрушения арктических берегов для юго-западной части Арктики (Амдерма, Марресалья, о. Белый, Харасавэй)

Так на ключевых участках на западном Ямале, которые долгие годы характеризовались как термоабразионные с характерными береговыми уступами, в последние годы стали обнаруживать признаки, типичные для термоденудационных берегов с характерными наплывами у подножья склонов. Такое изменение типа берегов может быть связано с тем, что усиление термического фактора динамики берегов опережает рост интенсивности волнового воздействия на берег, а также метасинхронностью воздействия указанных факторов.

Заключение

Происходящие в Арктике потепление климата выражается нарастанием экстремальных значений, а также проявляется в широком спектре процессов деградации многолетних мерзлых пород, состояние которых, чутко реагирующее на изменения климата, вызывает активизацию быстро протекающих экзогенных процессов. Особенность изменений климата и состояния окружающей среды в его быстроте, что потребовало развития методики оценок нестационарных экстремумов.

В качестве примера рассмотрена территория Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Для прогноза на середину 21 века использованы данные нескольких десятков моделей проекта CMIP6 в рамках сценария SSP5-8.5. Средние температуры января повысятся примерно на 3.5°C (на побережье Карского моря даже на 4.5°C), а в июле на ~2.5°C повсеместно. Месячные суммы осадков увеличатся в среднем на 10% в январе и останутся неизменными в июле. Расчет меняющихся с изменением климата экстремумов осуществлен путем синтеза данных CMIP6 и методов статистического оценивания экстремумов в условиях нестационарных климатических изменений. В итоге оказалось, что квантильные

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

5% и 95% значения температуры вырастут на 3 и 4,5°C в январе и на 2 и 3°C в июле. Квантильные 95% значения аномалий осадков увеличатся на 30% и 10% в январе и июле, соответственно.

Климатические данные послужили основой для расчетов различных прикладных климатических параметров и характеристик экзогенных процессов. Получено, что потепление в сочетании с ростом осадков приведет в ряде случаев к тому, что интенсивность и площадь, охваченная этими процессами, увеличиваются, например, процессы пучения и термокарст становятся более активными к 2050 году в связи с повышением температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания. В других случаях процессы, связанные с преобразованием вечной мерзлоты, могут затухать из-за ее полного или частичного исчезновения, как в таежной зоне южнее, где процессы растворения затухают из-за прерывистого или спорадического распространения вечной мерзлоты. Процессы, для которых динамика вечной мерзлоты не имеет решающего значения, протекают гораздо медленнее. Например, нет оснований ожидать существенного изменения карстовых процессов к середине XXI.

Для термоабразии, детальный анализ термического и ветроволнового режимов показал, что, во-первых, рост суммарной волновой энергии в результате расширения продолжительности безлёдного динамически активного периода частично компенсируется некоторым снижением ветро-волновой активности в отдельных районах Российской Арктики (Shabanova et al., 2018). Во-вторых, оказалось, что термический и волновой факторы разрушения термоабразионных берегов часто работают метасинхронно. Так, в год с положительной аномалией температуры, когда берег интенсивно оттаивает, сильные шторма, при которых волны выносили бы в море оттаявший грунт, могут не наблюдаться. Напротив, в холодный год, когда отложения берегового уступа оттаивают на незначительную глубину, волнового воздействия может оказаться недостаточно для отступления берега на ту же величину по сравнению с ситуацией теплого года, когда береговой уступ перед штормом успевает протаять. В обоих примерах потенциал разрушения берега реализуется не полностью.

Несмотря на заметное потепление климата и снижение ледовитости, катастрофического (многократного) увеличения скоростей разрушения термоабразионных берегов в морях Российской Арктики не произошло. Фиксируемые в настоящее время темпы отступления берегов криолитозоны лишь в 1,3-1,5 раза выше среднесуточных скоростей разрушения берегов в конце прошлого века.

Необходимо отметить, что на локальных участках заметное влияние на динамику берегов и развитие сопряженных экзогенных процессов оказывает хозяйственное освоение. Техногенные нарушения приводят к активизации опасных процессов. Прежде всего, нарушается термический режим мерзлых грунтов, что, в свою очередь, оказывает прямое и косвенное влияние на процесс разрушения морских берегов в условиях криолитозоны (Ogorodov, 2005). Значительная часть примеров резкого ускорения процесса разрушения берегов связана именно с техногенными воздействиями.

Работа А.В. Кислова и С.А. Мысленкова выполнена при поддержке гранта 23-Ш-07-33 «Экстремальные природные явления в Арктике в условиях современного потепления климата», выполняющегося в интересах Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, а также в рамках госзаказа № 121051400081-7 «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия».

Работа С.А. Огородова и Н.Н. Шабановой выполнена в рамках госзаказа №121051100167-1 «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики».

Литература

1. Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980. 158 с.
2. Кислов А.В., Антипина У.И., Корнева И.А. Экстремальные осадки Европейского сектора Арктики в летний период: статистика и синоптические модели // Метеорология и гидрология, 2021, №7, 20-34.
3. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология: Учеб. пособие для географических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1979, 287 с.
4. Общее резюме Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2022. <https://www.meteorf.gov.ru/product/climat/>
5. Огородов С.А. Влияние изменений климата и ледовитости арктических морей на динамику берегов Евразии // Проблемы Арктики и Антарктики, 2008, №1 (78), С. 123-128.
6. Огородов, С.А., Шабанова, Н.Н., Кессель, А.С., Баранская, А.В., and Разумов, С.О. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2022, 1, 26–42.
7. Попов Б.А., Совершаев В.А. Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // Вопросы географии. М.: Мысль, 1982. Вып. 119. С. 105–116.
8. Попов Б.А., Совершаев В.А. Принципы выбора исходных данных для расчета потоков волновой энергии // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 47–153.
9. Суркова Г.В., Крылов А.А. (2016) Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом море // Вестник Московского университета, сер, № 6, 18-25.
10. Andersland O.B., Ladanyi B. Frozen ground engineering, 2nd edition. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, p. 10–50.
11. Chemke R., Polvani L.M., Kay J.E. et al. Quantifying the role of ocean coupling in Arctic amplification and sea-ice loss over the 21st century // npj Clim Atmos Sci 4, 46, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00204-8>.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

12. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J. Recent Arctic Amplification and Extreme Mid-Latitude Weather // *Nat. Geosci.*, 7, 2014, 627–637.

13. Coles S. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag. 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>

14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049.

15. IPCC_AR6_SYR_LongerReport PDF (report.ipcc.ch)

16. Jamal M.H., Simmonds D.J., Magar V.. Modelling gravel beach dynamics with XBeach, *Coastal Engineering*, Volume 89, 2014, Pages 20-29.

17. Katz R.W. *Statistical Methods for Nonstationary Extremes*. In *Extremes in a Changing Climate: Detection, Analysis and Uncertainty*, A.A. Kouchak, D. Easterling, K.H.S. Schubert, S. Sorooshian Editors, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2013, 15-38.

18. Kislov A., Alyautdinov A., Baranskaya A., Belova N., Bogatova D., Vikulina M., Zheleznova I., Surkova G.A Spatially Detailed Projection of Environmental Conditions in the Arctic Initiated by Climate Change // *Atmosphere*, 14, 2003, 1003. <https://doi.org/10.3390/>

19. Kislov A., Matveeva T., Antipina U. Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season // *Atmosphere*, 13, 2022, 1116. <https://doi.org/10.3390/atmos13071116>.

20. Kulkarni, Rohit Rajesh Numerical Modelling of Coastal Erosion using MIKE21. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway 25th June 2013.

21. Ogorodov, S.A. Human impacts on coastal stability in the Pechora Sea // *Geo-Marine Letters. An International Journal of Marine Geology*, 2005, Vol. 25, N 2-3, P. 190-195.

22. Overduin, P.P., Wetterich, S., Günther, F., Grigoriev, M.N., Grosse, G., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W., and Makarov, A.: Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia, *The Cryosphere*, 2016, 10, 1449–1462.

23. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*, 356, 2017, 285–291. DOI: 10.1126/science.aai8204.

24. Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzsuh U., Morgenstern A., Couture N., Lantuit H. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada // *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 122, 2017. 1619–1634.

25. Screen J., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // *Nature* 464, 2010, 1334–1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>.

26. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis // *Glob. Planet. Chang.*, 77, 2011, 85–96.

27. Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western russian arctic coastal dynamics: xx-century history and current state. *Geography, environment, sustainability*. 2018;11(1):113-129.

28. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal Changes of Eurasian Snow, Surface Temperature and Atmospheric Circulation in the Late 1980s // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2015, 2738–2753. <https://doi.org/10.1002/2015JD023148>.

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ НА ДИНАМИКУ АРЕАЛОВ ОПАСНЫХ ИНВАЗИОННЫХ ВИДОВ В РОССИИ

В.Г. Петросян*, Ф.А. Осипов, И.Ю. Фенёва, А.А. Варшавский,
Н.Н. Дергунова, Л.А. Хляп

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва

**petrosyan@sevin.ru*

Аннотация. Представлены основные метрики динамики ареалов самых опасных инвазионных видов России (ТОП-100) в XXI веке под влиянием глобальных изменений климата с использованием GCM (Global Circulation Models) CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6). Мы использовали семь методов (GLM, GAM, GBS, FDA, RF, ANN и MaxEnt) для разработки надежных ансамблевых моделей распространения видов (eSDM) в современных (1970–2000 гг.) и будущих климатических условиях, полученных на основе GCM для 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 и 2081-2100 гг. Показано, что изменения ареалов зависят как от чувствительности GCM, так и от сценария (SSP α -y). Ареалы изученных видов по мере потепления климата будут расширяться. В отличие от общеизвестных закономерностей сдвига ареала видов на север в Северном полушарии, которые широко обсуждаются в мировой литературе, впервые показано, что в Северной Евразии основной сдвиг видového ареала происходит в северо-восточном направлении. По литературным данным потепление за последние 80 лет на 1 °C приводило к смещению ареала наземных и пресноводных видов на север со скоростью 19.7 км за десятилетие. Наши модели показывают, что за последующие 80 лет потепление на 1.93 °C приведет к сдвигу на 33±12 км, а потепление на 4.97 °C – на 118.7 ±32.3 км за десятилетие.

Ключевые слова: инвазии, моделирование, потепление климата, экосистемы, модели пространственного распространения

Введение

Глобальное изменение климата в настоящее время в самом разгаре: средняя глобальная температура уже повысилась на 1 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем (Scheffers et al., 2017). Концентрация парниковых газов в атмосфере, образующихся в результате сжигания ископаемого топлива, вырубки

лесов и т.д., приближается к уровню, который не был зафиксирован за последние 20 миллионов лет (Beerling, Royer, 2011). Это привело к изменению химического состава атмосферы, океанов и пресных вод Земли (IPCC, 2013; Smith et al., 2015). Эти изменения оказывают явное влияние на биофизические процессы на планете, включая опреснение и подкисление Мирового океана (Curry, Mauritzen, 2005), таяние вечной мерзлоты, ледяных покровов и ледников (Marzeion et al., 2014; Meier et al., 2014). Температура озер и рек повысилась, изменив сезонные закономерности смешивания и течения (Swinton et al., 2015). В настоящее время большинство экологических процессов демонстрируют реакцию на глобальное изменение климата. Эти процессы включают изменения генетического разнообразия (Thomann et al., 2015; Kovach et al., 2012), скорости метаболизма (Hawkes et al., 2007; Poloczanska et al., 2013), размеров тела животных (Brown et al., 2004; Sheridan et al., 2011), сроков миграции (Parmesan, Yohe, 2003; Poloczanska et al., 2013; Visser et al., 2005), рекрутинга динамики популяции (Parmesan, Yohe, 2003; Chambers et al., 2013), размера ареала (Parmesan, Yohe, 2003; Poloczanska et al., 2013), потери синхронизации межвидовых отношений (Jankowski et al., 2010) и продуктивности экосистем (Steinacher et al., 2010; Bellard et al., 2012).

Одной из наиболее быстрых реакций, наблюдаемых у морских, пресноводных и наземных видов, является изменение ареалов в соответствии с динамикой оптимальных условий обитания (Poloczanska et al., 2013; Tayleur et al., 2015; Lehikoinen et al., 2016; Scheffers et al., 2017). В наземных и водных экосистемах смещение северных границ видового ареала составило за десятилетие 19.7 км: 72 км у морских видов и 6 км у наземных видов (Poloczanska et al., 2013). Известно, что сдвиги ареалов морских видов в значительной степени зависят от региона их обитания и толерантности к повышению температуры (Burrows et al., 2011). В целом, наблюдается устойчивая тенденция к расширению ареалов тропических и теплолюбивых видов в новые среды, в которых ранее доминировали умеренные холодоустойчивые виды, т.е. происходит «тропикализация» (Vergés et al., 2014). С другой стороны, в Баренцевом море потепление привело к существенному сдвигу ареалов бореальных рыб и формированию новых сообществ в арктических водах, т.е. происходит «бореализация» (Fossheim et al., 2015). Помимо широтных изменений, многие наблюдаемые сдвиги размещения видов происходили по высотным градиентам. Например, в горах Новой Гвинеи птицы сместили свои места обитания вверх по склону на 95-152 м с 1965 по 2013 год (Fossheim et al., 2015). Аналогичное проникновение выше ранее известных высотных границ наблюдалось в последние десятилетия у обитающих в горных ручьях рыб во Франции (Comte et al., 2013), растений Северной Америки (Wolf et al., 2016) и насекомых острова Борнео (Chen et al., 2009).

Кроме проблемы глобального потепления климата, также имеется другая проблема – интенсификация биологических инвазий чужеродных видов, которая в последние годы входит в число острейших мировых проблем. Синергия воздействий глобального изменения климата и инвазионных видов (ИВ) представляет серьезную угрозу для биоразнообразия экосистем и благополучия людей

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

во всем мире, поэтому требуется принятие неотложных мер для минимизации отрицательных последствий в экологических, социально-экономических и медицинских сферах.

В 2018 г. группа российских специалистов подготовила перечень ста самых опасных ИВ России. Информация об этих видах обобщена в коллективной монографии (Самые опасные ..., 2018). В данной же работе основное внимание сосредоточено на моделировании ареалов этих ста опасных ИВ: бактерий, хромистов, грибов, сосудистых растений, альвеолят, гребневиков, нематод, моллюсков, членистоногих (ракообразных и насекомых), хордовых (асцидий, лучепёрых рыб, амфибий, рептилий, птиц, млекопитающих), и построении их прогнозного распространения на базе ансамбля моделей климата последней генерации CMIP6.

Цель работы – посредством разработки комплекса растрово-векторных баз данных локалитетов самых опасных инвазионных видов (ТОП-100) и предикторных переменных условий среды, а также моделей пространственного распределения и экологических ниш получить новые знания о динамике ареалов опасных инвайдеров на территории России в XXI веке.

Материалы и методы

Для построения моделей пространственного распространения видов был использован комплексный подход, состоящий из семи этапов. Описание всех этапов подробно представлено в работе (Petrosyan et al., 2023a). Ниже представлены наиболее важные аспекты разработанного подхода.

1. Выбор альтернативных моделей и сценариев будущих изменений климата в период с 2021 до 2100 гг.

Для оценки влияния глобальных изменений климата на динамику ареалов видов был выбран набор 12 из 40 глобальных климатических моделей шестой генерации CMIP6, которые охватывают весь диапазон изменения показателя долгосрочной равновесной чувствительности климата (ECS) от 1.83 до 5.67. Равновесная чувствительность климата определяется как изменения глобальной средней температуры приземного воздуха в результате удвоения концентрации углекислого газа (CO_2), после которого система океан – атмосфера – морской лёд достигнет равновесия. Отобранные нами модели (https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim2.5m.html) в зависимости от показателя ECS мы разделили на три группы: высокочувствительные модели (Hsens): CanESM5, CNRM-CM6, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR ($4.6 \leq \text{ECS} \leq 5.6$); умеренночувствительные модели (Msens): CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3-Veg, MRI ESM2-0, BCC-CSM2-MR ($3.0 \leq \text{ECS} \leq 4.3$) и низкочувствительные модели (Lsens): MIROC-ES2L, MIROC6, GISS-E2.1, INM-CM4.8 ($1.8 \leq \text{ECS} \leq 2.7$). Для всех 12 моделей были созданы растровые слои для различных сценариев изменения климата SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (SSPx-y) (Shared Socioeconomic Pathway – SSP) (IPCC,

2021) с разрешением 2.5 arc min (~5 км) для периода 2020–2100 гг. с шагом 20 лет. Переменные морской среды были выбраны из наборов данных MarSpec и Bio-ORACLE (Assis et al., 2017) для сценариев SSPx-у. Важно отметить, что глобальные базы данных MarSpec и Bio-ORACLE были разработаны без учета Каспийского моря, поскольку оно рассматривалось как крупнейшее замкнутое озеро в мире. В этой работе использованы созданные нами специальные слои для Каспийского моря и общая интегрированная морская глобальная база данных (ИМГБД), включающая акватории всех российских морей и океанов. Созданная ИМГБД включает слои как для текущего климата, так и для 4 сценариев его изменения до 2100 г. с шагом в 20 лет.

Для получения основных тенденций динамики ареалов в рамках трех групп моделей изменения климата (Hsens, Msens, Lsens) мы использовали усреднённые оценки изменения климата для четырех сценариев SSPx-у с 2021 по 2100 гг. с шагом 20 лет.

2. Выбор набора проксимальных переменных, определяющих пространственное распространение наземных, пресноводных и морских видов

Переменные из трех наборов WorldClim 2.1 (BIOCLIM) (Fick, Hijmans, 2017) и MarSpec/Bio-ORACLE проверяли и выбирали для включения их в модели с помощью R-пакета ENMTools. Были исключены те переменные, между которыми парный коэффициент корреляции Спирмана был больше 0.72 по абсолютному значению. Мультиколлинеарность оценивали по показателю VIF (фактор инфляции вариации) с помощью R-пакета Usdm. Предикторная переменная считается мультиколлинеарной и исключается из модели, если $VIF > 5$. Эта двухэтапная процедура позволила нам выбрать шесть экологических переменных из баз данных BIOCLIM и MarSpec/Bio-ORACLE, которые использовались для построения SDM видов, обитающих в экосистемах суши (наземные, околотоводные и пресноводные) и океана (морские). Переменные окружающей среды из набора включали Bio1 (среднегодовая температура), Bio5 (максимальная температура самого теплого месяца), Bio11 (средняя температура самого холодного квартала), Bio12 (годовое количество осадков), Bio13 (осадки самого влажного месяца), Bio14 (осадки самого засушливого месяца). Переменные окружающей среды, выбранные из наборов данных MarSpec/Bio-ORACLE, включали батиметрию (Bathymetry - глубина морского дна), Biogeo05 (расстояние до берега), Biogeo08 (среднегодовая соленость поверхности моря), Biogeo11 (годовой диапазон солености поверхности моря), Biogeo13 (среднегодовая температура поверхности моря) и Biogeo16 (годовой диапазон температуры поверхности моря).

3. Проверка автокоррелированности точек находок с учетом выбранных предикторных переменных

Данные по распространению самых опасных инвазионных видов (ТОП-100 России) из 16 таксономических групп включали 2 994 508 записей присутствия видов в нативной и инвазионной частях ареалов, подробный перечень опубли-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

кован нами ранее (Petrosyan et al., 2023b). Применение таксономического и географического фильтров уменьшило количество точек находок (ТН) до 169 709 записей. Дальнейшее применение специальной процедуры для уменьшения пространственной автокорреляции ТН позволило получить 23 302 (0.8% от полного набора ТН) случайно распределенных точек в областях обучения моделей.

4. Определение оптимальных параметров индивидуальных моделей (iSDM)

Поскольку параметры моделей пространственного размещения вида, полученные с помощью семи методов: GLM (Обобщенной линейной модели), GAM (Обобщенной аддитивной модели), GBM (Обобщенной бустинг модели), RF (модели случайного леса), FDA (модели гибкого дискриминантного анализа), ANN (модели искусственной нейронной сети) и MaxEnt (максимальной энтропии), – не всегда оптимальны, то для получения оптимальных параметров iSDM использована специальная тонкая настройка функции `Biomod2_tuning` (Thuiller et al., 2021).

5. Построение индивидуальных моделей (iSDM) с использованием набора альтернативных методов и оценка их производительности

С помощью GLM, GAM, GBM, RF, FDA, ANN, MaxEnt с оптимальными параметрами были построены iSDM для каждого из видов ТОП-100 в условиях текущего климата с использованием R-пакета `Biomod2` (Thuiller et al., 2021). Прогностическая эффективность каждой модели оценена путем многократной разбивки выборки на две части: модели были откалиброваны с использованием 80% ТН, а оценка точности проведена по оставшимся 20% ТН. Эта процедура повторялась десять раз.

Мы использовали две метрики оценки пригодности iSDM: истинную статистику навыков (TSS), и площадь под кривой ROC (AUC) (Thuiller et al., 2021). Для окончательной оценки пригодности моделей использован индекс Бойса (Petrosyan et al., 2020). Мы рассчитали индекс Бойса для каждой из 10 реализаций моделей и усреднили значения, получив окончательные оценки с помощью созданной нами специальной R-программы.

6. Построение ансамблевых моделей (eSDM) в условиях текущего климата и при различных моделях и сценариях изменения климата

Для создания eSDM мы использовали семь индивидуальных моделей (iSDM) для каждого вида (см.п. 4.). Ансамблевые модели были созданы для трех групп усредненных моделей изменения климата (Hsens, Msens, Lsens) для видов экосистем суши и одной усредненной модели (MeanModel) для морских видов в рамках 4 сценариев, чтобы получить центральные тенденции изменения ареала видов в период 2021-2100 гг. с шагом 20 лет. Результирующие текущие (в условиях текущего климата 1970-2020 г) и будущие консенсусные модели были получены путем расчета средневзвешенного значения вероятности пригодности местоо-

битания вида. Эти процедуры привели к созданию для каждого вида по одной карте eSDM в условиях текущего климата. Для каждого из видов экосистем суши создано по 48, а для каждого из морских видов – по 16 карт eSDM в условиях будущих изменений климата. Затем мы преобразовали карты вероятностей, полученные из ансамблевых моделей, в двоичные (бинарные) карты, указывающие подходящие и неподходящие местообитания для вида с использованием пороговых значений на основе критерия max TSS (Guisan et al., 2017).

7. Оценка динамики ареалов видов при реализации различных моделей и альтернативных сценариях изменения климата

Оценка динамики ареалов видов при реализации различных моделей и сценариев изменения климата для конкретного периода времени производилась на основе сравнения бинарной eSDM в условиях текущего климата (2020 г.) с бинарной eSDM, полученной для конкретного периода (2021-2040, 2041-2060; 2061-2080, 2081-2100 гг.). Использовано три индекса (метрики) – Gain, Loss и Change. Метрика Gain оценивает процент приобретения местообитаний, которые не использовались в условиях текущего климата. Loss характеризует процент потери местообитаний в условиях нового климата. Change по величине представляет разницу Gain-Loss и характеризует процент изменения ареала в условиях нового климата. Эти оценки выполнены с помощью пакета Biomod2.

Сравнительный анализ индексов Gain, Loss, Change для различных типов моделей (Hsens, Msens, Lsens) и MeanModel, сценариев (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) и периодов (2021-2040, 2041-2060; 2061-2080, 2081-2100) проводили с помощью трёхфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с фиксированными эффектами. Эти 4 сценария (SSPx-y) характеризуются разным уровнем увеличения солнечной радиации 2.6 Вт/м², 4.5 Вт/м², 7.0 Вт/м² и 8.5 Вт/м², соответственно, при глобальном потеплении климата.

Результаты

Предикторные переменные для группы GCM (Hsens, Msens, Lsens) и сценариев (SSPx-y) изменения климата

Проведенный анализ моделей изменения климата в рамках протокола СМIP6 позволил, для изучения биологических инвазий в России, выбрать в терминах метрики равновесной климатической чувствительности (ECS) три группы моделей: высоко-, умеренно- и низкочувствительные (ECS = 4.6-5.6 °C, 3.0 -4.3 °C и 1.80-3.00 °C соответственно). Оценки показывают, что временные закономерности изменения температуры и осадков, усредненные по моделям и сценариям, имеют похожие черты, но они различаются по величине. Например, если среднее потепление по всем моделям и сценариям достигает 1.5 (±0.2) °C к 2040 г. по сравнению с исходным уровнем 1850–2020 гг., то в рамках трех групп моделей Hsens, Msens, Lsens потепление к 2040 г. составляет 1.66 (±0.15)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

°С, $1.53 (\pm 0.17)$ °С и $1.30 (\pm 0.17)$ °С соответственно (рис. 1). Максимальный уровень потепления ожидается в конце XXI века. По всем моделям и сценариям в среднем он увеличится на 4.97 °С, для высокочувствительных моделей Hsens на $6.11 (\pm 2.75)$ °С. Для умеренно и низкочувствительных моделей Msens и Lsens уровень потепления ниже и составит $4.76 (\pm 2.21)$ °С и $4.03 (\pm 1.86)$ °С соответственно (рис. 1).

Оценки показывают, что на фоне потепления происходит уменьшение суточной амплитуды температуры (Bio02), величина которой принимает наибольшее значение для высокочувствительных моделей (Hsens). В конце XXI века ожидается уменьшение Bio02 для GCM Hsens, Msens и Lsens на 9% (-1.26 °С), 4% (-0.35 °С) и 1% (-0.09) соответственно. Эти группы моделей показывают увеличение максимальной температуры самого теплого месяца года (Bio05) в конце века на 6.9 °С (37% - Hsens), 6.4 °С (34% - Msens) и 5.9 °С (32% - Lsens). В отличие от температуры (Bio01, Bio02, Bio5) различия количества осадков (Bio12, Bio14) для различных групп GCM менее значимы.

Оценки показали, что в конце XXI века увеличение суммарных годовых осадков (Bio12) и суммарных осадков сухого месяца года (Bio14) характеризуются следующими величинами: для Hsens: Bio12 – 14% (61 мм), Bio14 – 18% (2.7 мм); Msens: Bio12 – 14% (62 мм), Bio14 – 12% (1.9 мм) и Lsens: Bio12 – 11% (47 мм), Bio14 – 11% (1.8 мм).

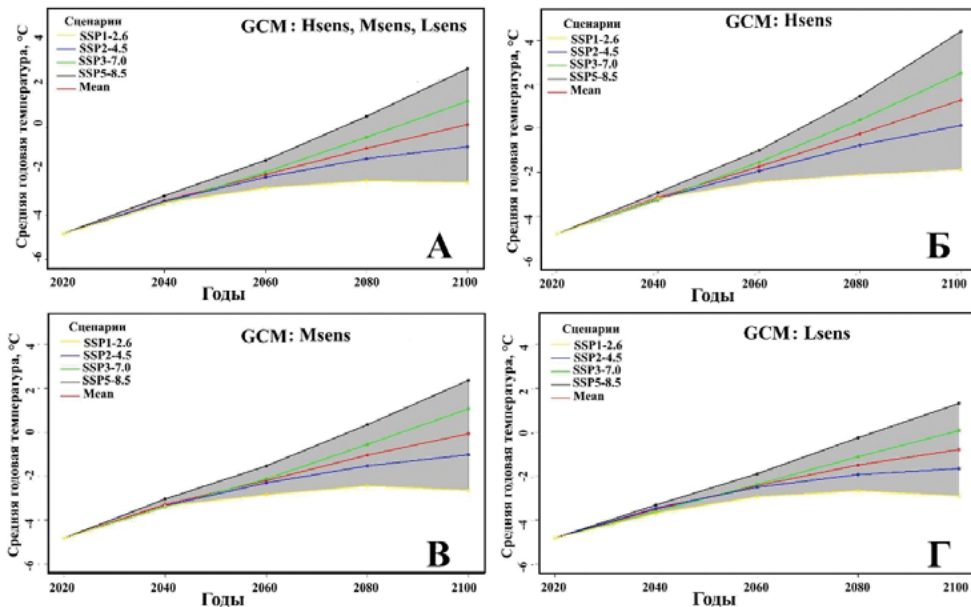


Рис. 1. Оценки средней годовой температуры воздуха в период 2021-2100 гг. для трех групп GCM (А), высоко- (Б), умеренно- (В) и низкочувствительных (Г) моделей при реализации различных сценариев изменения климата SSPx-у

Сравнительный анализ метрик изменения ареалов видов из разных таксонов под влиянием глобальных изменений климата

Анализ 1776 eSDM для 37 видов из 4 таксономических групп (бактерий, хромистов, грибов и сосудистых растений) показал, что масштабы и характер изменений мест обитания в условиях потепления климата различны для разных групп. Наибольшее расширение ареалов наблюдается у бактерий (Change=456-724%) и хромистов (Change=459-603%). Эти таксоны в основном расширяют свой ареал за счет приобретения новых мест обитания в сочетании с наименьшими потерями современных местообитаний. Наименьшее изменение регионов обитания наблюдается для грибов (Change=124-156%) и растений (89-101%). Для этих таксонов изменения ареала характеризуются сдвигом мест обитания и освоением новых регионов с наибольшей утратой мест современного обитания. Среди вышеуказанных таксонов наиболее чувствительны к потеплению климата сосудистые растения, у которых потери (Loss) современных местообитаний, усредненные по всем моделям и сценариям, могут составить 77%. У бактерий, хромистов и грибов потери современных местообитаний значительно меньше 38%, 30% и 58% соответственно. Ансамблевые модели также показывают, что наиболее уязвимые районы России, где ожидаются экспансии и вселения ИВ, лежат на севере европейской части России и на Дальнем Востоке.

Построенные 1488 eSDM для 43 видов беспозвоночных животных (альвеолят, гребневиков, нематод, моллюсков, ракообразных и насекомых) показали иные метрики. Гребневики, по сравнению с альвеолятами, потеряют меньше мест обитания, а также приобретут меньше новых мест обитаний. К 2100 г. индекс Change для гребневиков при различных сценариях составит 3.79-31.6%. Анализ динамики ареалов моллюсков проведен отдельно для пресноводных (5 видов) и морских (7 видов). Потери местообитаний пресноводных моллюсков (Loss) к 2100 г составят 30.2-45.8%, метрика Gain: 146-548%, Change: 116-502%. Эти же метрики (Loss: 1-2%, Gain: 24-96%, Change: 23-96%) для морских моллюсков значительно меньше, чем для пресноводных видов. Среди ракообразных 9 морских и 3 пресноводных вида. Индексы изменения ареалов к 2100 г. пресноводных ракообразных (Loss: 3-3.9%, Gain: 133-509%, Change: 130-505%) также выше, чем морских (Loss: 4.7-14.3%, Gain: 17-81.4%, Change: 12.3-67.1%). Ключевые метрики (Loss: 12.5-32.3%, Gain: 255-1400%, Change: 242-1368%) динамики ареала насекомых показали наибольшую чувствительность этих беспозвоночных к глобальному изменению климата.

Использование 899 eSDM позволило установить основные тенденции динамики ареалов 19 видов из следующих таксонов хордовых: асцидии, рыбы, амфибии, рептилии, птицы и млекопитающие. Средние значения потери мест обитания (Loss) для этих животных при реализации альтернативных моделей и сценариев изменения климата к 2100 г. составят $2.8 \pm 1.9\%$, $10.4 \pm 3.6\%$, $1 \pm 0.3\%$, $80 \pm 4\%$, $14 \pm 4\%$ и $5 \pm 3\%$ соответственно.

При этом приобретенные места обитания (Gain), которые не использовались видами из этих групп в условиях текущего климата, значительно больше и составят

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

34±13%, 324±21%, 232±10%, 299±14%, 209±11% и 167±12% соответственно. Общие оценки изменения (Change) ареала видов из этих 6 таксонов к 2100 г. при реализации различных моделей и сценариев составят 31.5±11%, 313±21%, 231±10%, 219±14%, 194±12% и 161±12% соответственно. Наш анализ показал, что изменения ареалов зависят как от чувствительности GCM, так и от сценария (SSPx-y).

Общая оценка метрик изменения ареалов экологически различающихся видов под влиянием глобальных изменений климата

Мы оценили изменение ареалов видов четырех крупных экологических групп: морские, пресноводные, околородные и наземные, при этом использовали следующие параметры: 1) размер современного ареала (в пикселях) в условиях текущего климата (в 1970-2000 г.) и размер ареалов по 20-летиям XXI в.; 2) индексы Gain, Loss, Change, характеризующие доли сохранения, потери и приобретения мест обитания для каждого из 20-летних периодов; 3) географические координаты центроида ареала, по которым определяли географический сдвиг ареала (в км) каждого вида от его положения в современных условиях (1970-2000 гг.) до будущего (по 20-летиям).

Использование 4163 eSDM позволило установить основные количественные характеристики динамики ареалов при изменении климата для видов из 4 экологических групп (рис. 2).

Средние значения метрики Loss для морских, пресноводных, околородных и наземных видов составляют 4.2 (±2.05)%, 13.3 (±3.06)%, 35 (±7.27)%, 28.28 (±0.89)% соответственно (рис. 2А). При этом средние значения метрик приобретения Gain в 2021-2100 гг. значительно больше, составляя 23.3 (±10.98)%, 227.7 (±16.37)%, 211.1 (±38.83)%, 224 (± 4.78)% соответственно (Рис. 2В), а средние оценки изменения ареала в 2021-2100 г. составляли 19.1 (±10.96)%, 214.5 (±16.34)%, 176.2 (±38.76)%, 195.7 (±4.77)% соответственно (рис. 2Д). Из динамики метрик Gain, Loss, Change (рис. 2 Б, Г, Е) следует, что пресноводные больше всех изменяют ареал под влиянием изменения климата.

Сравнительный анализ географического сдвига ареалов для каждой из экологических групп проводили с помощью трех моделей дисперсионного анализа с фиксированными эффектами. С помощью моделей 1 и 2 оценивали сдвиг ареалов во времени по широте и долготе (рис. 3А, Б). В модели 3 географический сдвиг ареала по дистанциям между центроидами определяли в зависимости от двух основных факторов: «временной интервал» – четыре 20-летних периода и «экологическая группа» – четыре группы (рис. 3В). Получено, что сдвиг центроидов ареалов за десятилетие по широте у пресноводных (82.3±4.6 км) и околородных (86.7±14.5 км) видов больше, чем у морских (36.4±14.5 км) и наземных видов (64.4±14.5 км) (рис. 3А). По долготе (с запада на восток) наибольший сдвиг центроидов за десятилетие отмечен у наземных видов (117.8±25.7 км), минимальный у морских видов (54.9±25.7 км). Пресноводные (71.83±25.7 км) и околородные (95.5±25.7 км) занимали промежуточное положение (рис. 3Б). Только у пресноводных видов сдвиг центроидов ареалов по широте больше сдвига по долготе. Для остальных групп – сдвиг центроидов по долготе больше широтного сдвига.

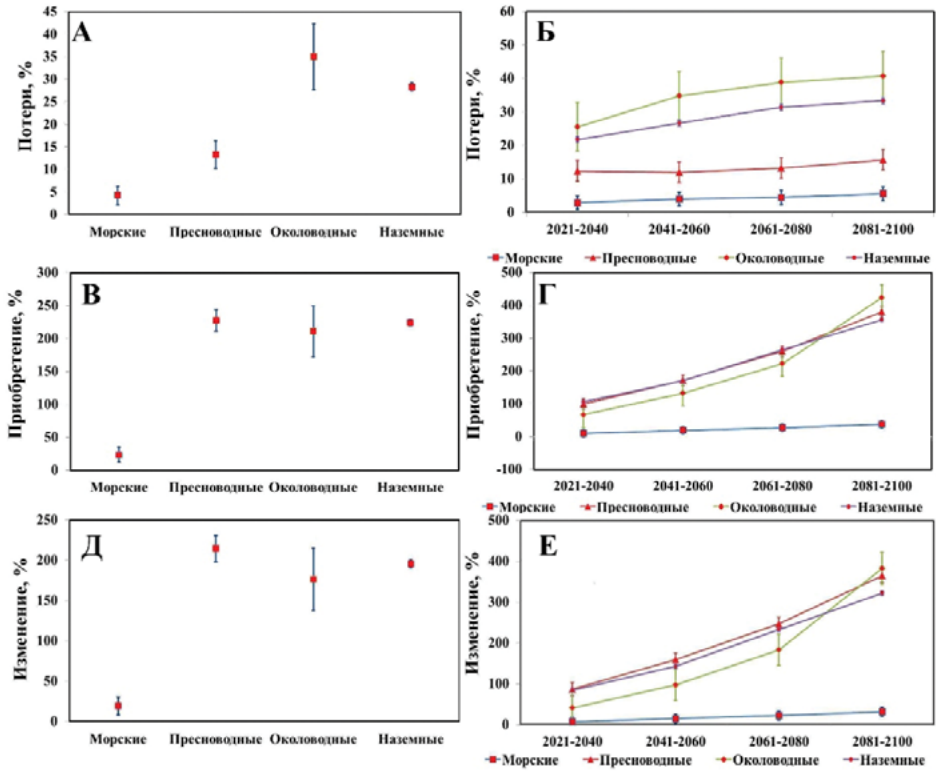


Рис. 2. Метрики (Gain, Loss, Change) изменения ареалов под влиянием глобального потепления климата (А, В, Д) – средние значения метрик, изменение метрик по 20-летним периодам (Б, Г, Е)

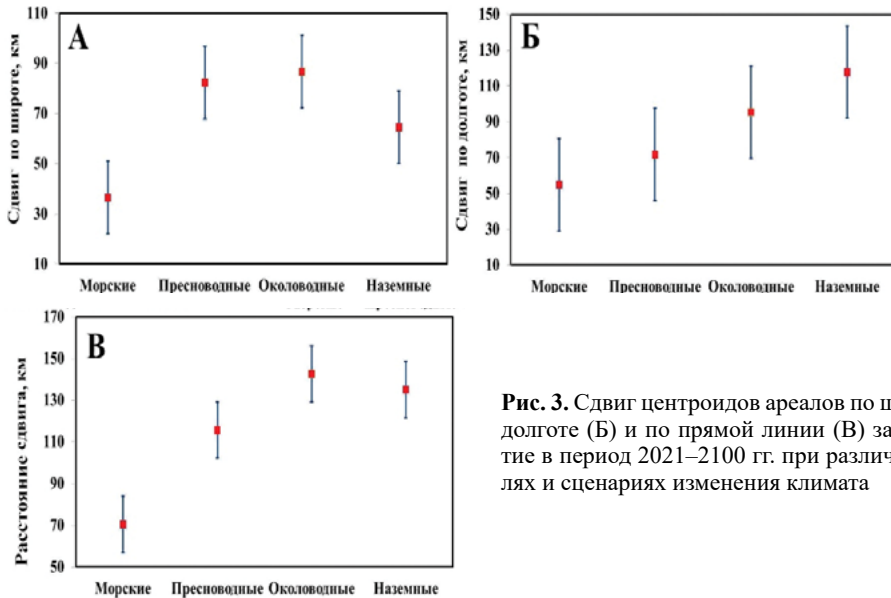


Рис. 3. Сдвиг центров ареалов по широте (А), долготы (Б) и по прямой линии (В) за десятилетие в период 2021–2100 гг. при различных моделях и сценариях изменения климата

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Дистанции сдвига в северо-восточном направлении для экологических групп морских, пресноводных, околородных и наземных видов за десятилетие составляют 71 ± 13.5 км, 116 ± 13.5 км, 142 ± 13.5 км, 135 ± 13.5 км (Рис. 3В). Наш анализ показал, что изменения ареалов зависят как от чувствительности GCM, так и от сценария (SSPx-у). Основная тенденция для всех видов – расширение ареала на северо-восток.

Для оценки влияния глобального потепления на динамику распределения ИВ по России были созданы синтетические карты после бинаризации и сложения индивидуальных ансамблевых моделей (eSDM), полученных с учетом GCM и SSPx-у для всех временных периодов. Карты видового богатства ИВ в условиях текущего климата (1970-2020 гг.) и его изменения согласно Hsens-моделям и сценарию SSP5-8.5 представлены на рис. 4.

В условиях текущего климата горячие зоны с наибольшим количеством ИВ лежат на юге, западе и в центре Европейской России (Рис. 4А), максимально совместно обитало 64 ИВ. При потеплении климата горячие зоны видового разнообразия смещаются на север Европейской России, при этом максимальное количество видов увеличивается до 72 (Рис. 4Б). Количество ИВ увеличивается и в Азиатской части России, особенно по восточной границе страны.

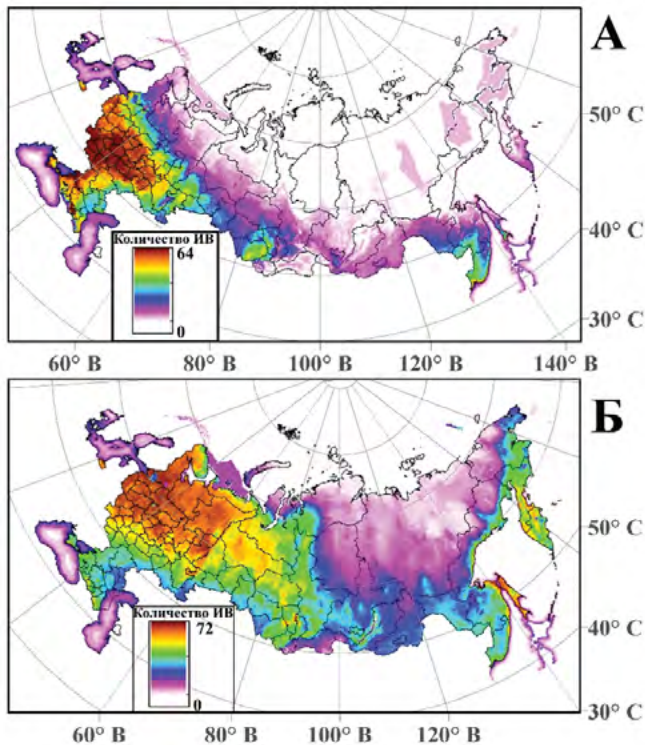


Рис. 4. Видовое богатство ИВ в условиях текущего климата (А) и в 2081–2100 гг. при изменении климата по модели GCM Hsens и сценарию SSP5-8.5 (Б)

Обсуждение

Реалистичные модели глобального изменения климата в XXI веке

В настоящее время GCM CMIP6 используются учеными и политиками для интерпретации прошлых и будущих изменений климата. Однако эти модели характеризуются значительной неопределенностью. Как мы отмечали ранее, показатель ECS колеблется от 1.83 °C до 5.67 °C, т. е. прогнозируемые ими уровни потепления в XXI веке очень неопределенны. В последние годы (2020–2022 гг.) было проведено снижение неопределенности путем проверки согласованности между модельными оценками уровней потепления в 1980–2021 гг., полученными на основе GCM CMIP6 и реальных записей приземной температуры воздуха по данным ERA5-T2m (Scafetta et al., 2022; Petrosyan et al., 2023a). Результаты показали, что GCM с высокой и умеренной ECS плохо согласуются с реальными данными наблюдений. Однако группы GCM с низкой ESC оказались полностью совместимыми, по крайней мере, на глобальном масштабе. Несмотря на важность выполненного анализа, его основные выводы требуют дальнейшей проверки. И хотя из-за отсутствия точных оценок мы использовали все три группы GCM, особое внимание уделено моделям Lsens GCM по сценарию SSP1-2.6 (Lsens GCMs-SSP1-2.6), которые находятся в полном соответствии с эмпирическими данными. Согласно этим моделям в ближайшие десятилетия XXI века ожидается умеренное потепление, т.е. ΔT для периодов 2021–2040 и 2041–2060 гг. составит менее 2.0 °C ($\Delta T = 1.13$ °C и 1.89 °C соответственно). Потепление в период 2061–2080 гг. может составить 2.15 °C, но после того, как выбросы CO₂ сократятся до нуля примерно к 2075 г., ΔT в период 2081–2100 гг. составит 1.93 °C.

Почему глобальное потепление вызывает изменение границ ареалов?

Поведенный анализ опубликованных результатов влияния глобального потепления климата на природные системы показали, что изменения охватывают различные уровни организации живого: от молекулярно-генетического до экосистем (Scheffers et al., 2017). Однако изменения границ ареала вида можно отнести к раннему биологическому индикатору изменения климата. Можно утверждать, что документированная реакция видов на глобальное потепление и изменение ареалов в соответствии с оптимальными условиями обитания подтверждается концепцией консерватизма экологических ниш. Это означает, что при потеплении виды выбирают те же условия окружающей среды, что и ранее (Petrosyan et al., 2023c). Оценка видовых ниш помогает выявить закономерности распределения видов на локальном, региональном и глобальном уровнях, механизмы, лежащие в основе симпатрического и аллопатрического видообразования, адаптаций видов к различным условиям окружающей среды. Хотя в литературе существуют споры о консерватизме и закономерностях динамики ниш, тем не менее, наш анализ и мета-анализ ниш 534 видов (Liu et al., 2020; Petrosyan et al., 2023c) позволили утверждать, что существует очень ограниченное расширение ниш видов.

Какой основной вывод следует из построенных ансамблевых моделей динамики ареалов инвазионных видов под влиянием глобального изменения климата?

Построенные ансамблевые модели динамики ареалов в зависимости от чувствительности модели GCM и сценария SSPx-у изменения климата показали, что сдвиг ареалов видов происходит в северо-восточном направлении вне зависимости от уровня потепления. Однако скорости сдвига центроидов ареалов зависят от величины потепления. Если в условиях потепления в соответствии с моделями Lsens и сценарием SSP1-2.6 скорость смещения ареалов на северо-восток составляет 33 ± 12 км за десятилетие, то средняя оценка сдвига ареалов по всем моделям (Hsens, Msens, Lsens) и сценариям (SSPx-у) составит 118.7 ± 32.3 км за десятилетие. Причем в первом случае ожидаемое потепление в период 2081–2100 гг. составит 1.93 °C, во втором случае – 4.97 °C. В итоге, если потепление климата на 1 °C за предыдущие 80 лет уже привело к сдвигу ареалов наземных и пресноводных видов на 19.7 км за десятилетие, то за последующие 80 лет потепление на 1.93 °C приведет к сдвигу на 33 ± 12 км, а потепление на 4.97 °C – на 118.7 ± 32.3 км за десятилетие.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 21-14-00123.

Литература

1. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Ред. Ю.Ю. Дгебугадзе, В.Г. Петросян, Л.А. Хляп. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2018. 688 с.
2. Assis, J., Tyberghein L., Bosh S., Verbruggen H., Serrão E. A., De Clerck O. Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modeling // *Global Ecology and Biogeography*, 2017, V. 27, № 3, P. 277-284.
3. Beerling D.J., Royer D.L. Convergent Cenozoic CO₂ history // *Nat. Geosci.* 2011, 4, P. 418–420. DOI 10.1038/ngeo1186.
4. Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W., Courchamp F., Impacts of climate change on the future of biodiversity // *Ecol. Lett.*, 2012, 15, P. 365–377.
5. Brown J.F., Gillooly Allen A.P., Savage V.M., West G.B. Toward a metabolic theory of ecology // *Ecology*, 2004, 85, 1771–1789. DOI: 10.1890/03-9000.
6. Burrows M.T., Schoeman D.S., Buckley L.B. et al., The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems // *Science*, 2011, 334. P. 652–655.
7. Chambers L. E., Altwegg R., Barbraud C. et al. Phenological changes in the southern hemisphere // *PLOS ONE*, 2013, 8, e75514.
8. Chen I.C., Shiu H.J., Benedick S. et al. Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2009, 106, P. 1479–1483. DOI 10.1073/pnas.0809320106.
9. Comte L., Grenouillet G. Do stream fish track climate change? Assessing distribution shifts in recent decades // *Ecography*, 2013, 36. P. 1236–1246.

10. Curry R., Mauritzen C. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades // *Science*, 2005, 308. P. 1772–1774. DOI 10.1126/science.1109477.
11. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*, 2017, 37 (12), P. 4302–4315.
12. Fossheim M., Primicerio R., Johannesen E. et al. Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic // *Nat. Clim. Chang.*, 2015, 5. P. 673–677. DOI 10.1038/nclimate2647.
13. Freeman B.G., Class Freeman A.M. Rapid upslope shifts in New Guinean birds illustrate strong distributional responses of tropical montane species to global warming // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2014, 111. P. 4490–4494.
14. Guisan A, Thuiller W, Zimmermann NE. Habitat suitability and distribution models. Cambridge University Press, 2017. 496 p.
15. Hawkes L.A., Broderick A.C., Godfrey M.H., Godley B.J. Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population // *Glob. Change Biol.* 2007, 13. P. 923–932. DOI 10.1111/j.1365-2486.2007.01320.x.
16. IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1535 p.
17. IPCC (2021). *Sixth Assessment Report of the IPCC Working Group I.* // (<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>). Проверено 14.08.2022.
18. Jankowski J.E., Robinson S. K., Levey D.J., Squeezed at the top: Interspecific aggression may constrain elevational ranges in tropical birds // *Ecology*, 2010, 91. P. 1877–1884. DOI 10.1890/09-2063.1.
19. Kovach R.P., Gharrett A.J., Tallmon D.A. Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population // *Proc. Biol. Sci.*, 2012, 279. P. 3870–3878.
20. Lehikoinen C., Virkkala R. North by north-west: Climate change and directions of density shifts in birds // *Glob. Change Biol.*, 2016, 22. P. 1121–1129.
21. Liu C., Wolter C., Xian W., Jeschke J.M. Most invasive species largely conserve their climatic niche // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2020, 117(38). P. 23643–23651.
22. Marzeion B., Cogley J. G., Richter K., Parkes D. Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes // *Science*, 2014, 345, P. 919–921. DOI 10.1126/science.1254702.
23. Meier W. N., Greta K. Hovelsrud G.K., Bob E.H. et al. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity // *Rev. Geophys.* 2014, 52. P. 185–217.
24. Naimi B., Hamm N.A.S., Groen T.A., Skidmore A.K., Toxopeus A.G. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling // *Ecography*, 2014, 37(2). P. 191–203. DOI 10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x.
25. Ospina-Álvarez N., Piferrer F. Temperature-dependent sex determination in fish revisited: Prevalence, a single sex ratio response pattern, and possible effects of climate change // *PLOS ONE*, 2008, 3, e2837. DOI 10.1371/journal.pone.0002837.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

26. Parmesan C., Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems // *Nature*, 2003, 421. P. 37–42. DOI 10.1038/nature01286.

27. Petrosyan V., Osipov F., Bobrov V., Dergunova N., Omelchenko A., Varshavskiy A., Danielyan F., Arakelyan M. Species Distribution Models and Niche Partitioning among Unisexual *Darevskia dahli* and Its Parental Bisexual (*D. portschinskii*, *D. mixta*) Rock Lizards in the Caucasus // *Mathematics*, 2020 8(8): 1329. DOI 10.3390/math8081329.

28. Petrosyan V., Dinets V., Osipov F., Dergunova N., Khlyap L. Range Dynamics of Striped Field Mouse (*Apodemus agrarius*) in Northern Eurasia under Global Climate Change Based on Ensemble Species Distribution Models // *Biology*, 2023a, 12. 1034. DOI 10.3390/biology12071034.

29. Petrosyan V., Osipov F., Feniova I., Dergunova N., Warshavsky A., Khlyap L., Dzialowski A. The TOP-100 most dangerous invasive alien species in Northern Eurasia: invasion trends and species distribution modeling // *NeoBiota*. 2023b. 82. P. 23–56. DOI 10.3897/neobiota.82.96282.

30. Petrosyan V.G., Osipov F.A., Bobrov V.V., Dergunova N.N., Danielyan F.D., Arakelyan M.S. Analysis of geographical distribution of the parthenogenetic rock lizard *Darevskia armeniaca* and its parental species (*D. mixta*, *D. valentini*) based on ecological modelling // *Salamandra*, 2020, 55. P. 173–190.

31. Petrosyan V.G., Osipov F.A., Feneva I.Y., Khlyap L.A. Ecological Niches Modelling of the TOP-100 Most Dangerous Invasive Species in Russia: Testing the Hypothesis of Ecological Niche Conservatism // *Biol Bull Russ Acad Sci.*, 2023c, 50 (Suppl 1), P. 63–S84. DOI 10.1134/S106235902360126X.

32. Poloczanska E.S., Brown C.C., Sydeman W.J. et al. Global imprint of climate change on marine life // *Nat. Clim. Chang.*, 2013, 3. P. 919–925.

33. Rézouki C. et al. Socially mediated effects of climate change decrease survival of hibernating Alpine marmots // *J. Anim. Ecol.*, 2016, 85. P. 761–773.

34. Sbrocco E.J., Barber P.H. MARSPEC: ocean climate layers for marine spatial ecology // *Ecology*, 2013, 94(4). P. 979–979. DOI 10.1890/12-1358.1.

35. Scafetta N. Advanced testing of low, medium, and high ECS CMIP6 GCM simulations versus ERA5-T2m // *Geophys. Res. Lett.*, 2022, 49, e2022GL097716.

36. Scheffers B.R., Meester L.D., Bridge T.C.L., et al. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people // *Science* 2016, 354. P. 7671–7679.

37. Sheridan J., Bickford D. Shrinking body size as an ecological response to climate change // *Nat. Clim. Chang.*, 2011, 1. P. 401–406. DOI 10.1038/nclimate1259.

38. Smith S.J., Edmonds J., Hartin C., Mundra A., Calvin K. Near-term acceleration in the rate of temperature change // *Nat. Clim. Chang.*, 2015, 5. P. 333–336. DOI 10.1038/nclimate2552.

39. Steinacher M., Joos F., Frolicher T.L. et al. Projected 21st century decrease in marine productivity: A multi-model analysis // *Biogeosciences*, 2010, 7. P. 979–1005.

40. Swinton M.W., Eichler L.W., Farrell J.L., Boylen C.W. Evidence for water temperature increase in Lake George, NY: Impact on growing season duration and degree days // *Lake Reservoir Manage.*, 2015, 31. P. 241–253.

41. Tayleur C., Caplat P., Massimino D. et al. Swedish birds are tracking temperature but not rainfall: Evidence from a decade of abundance changes // *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 2015, 24. P. 859–872.
42. Thuiller W., Georges D., Gueguen D., Engler R., Breiner F. Ensemble Platform for Species Distribution Modeling (2021). Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf> (accessed on 6 July 2021).
43. Thomann M., Imbert E., Engstrand R.C., Cheptou P.-O. Contemporary evolution of plant reproductive strategies under global change is revealed by stored seeds // *J. Evol. Biol.*, 2015, 28. P. 766–778.
44. Vergés A., Steinberg P., Hay M. et al. The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts // *Proc. R. Soc. B, Biol. Sci.*, 2014, 281, 20140846.
45. Visser M. E., Both C. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick // *Proc. R. Soc. B, Biol. Sci.*, 2005, 272. P. 2561–2569.
46. Wolf A., Zimmerman N.B., Anderegg W.R.L., Busby P.E., Christensen J. Altitudinal shifts of the native and introduced flora of California in the context of 20th-century warming // *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 2016, 25. P. 418–429.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ В РОССИИ: РЕЙТИНГ РЕГИОНОВ ПО НЕОБХОДИМОСТИ АДАПТАЦИИ¹

И.А. Макаров^{1*}, А.В. Чернокульский²

¹ НИУ ВШЭ, Москва

² Институт физики и атмосферы имени А.М. Обухова; НИУ ВШЭ, Москва

**imakarov@hse.ru*

Аннотация. Последствия изменений климата сопряжены со значительным потенциальным ущербом для населения и экономики. Для минимизации этого ущерба необходима система адаптационных мероприятий, при этом мероприятия должны быть ранжированы в зависимости от уровня климатических рисков. В данном исследовании оценены климатические риски для субъектов Российской Федерации с учетом климатического воздействия, подверженности этому воздействию и уязвимости к нему. Составлен рейтинг регионов по уровню физических рисков изменения климата и необходимости адаптации к ним. Рейтинг представлен для четырех ключевых типов воздействия изменения климата: влияния аномально высокой температуры воздуха на здоровье городского населения; влияния засух на сельское хозяйство; учащения лесных пожаров и таяния вечной мерзлоты. Полученные результаты представлены отдельно для регионального и федерального уровней целеполагания и дают объективную основу для расстановки приоритетов финансирования адаптационных мероприятий.

Ключевые слова: изменение климата, климатические риски, адаптация к изменению климата, региональная экономика.

Введение

В последние десятилетия проблема изменения климата стала одной из центральных тем в международной повестке дня. Изменение климата проявляется, в том числе, в повышении средней глобальной температуры, подъеме уровня Мирового океана и росте кислотности океана, изменении режима выпадения

¹ Данный материал основан на статье: Макаров И.А., Чернокульский А.В. (2023). Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. № 4 (61). С. 145–202

осадков, таянии ледников и морских льдов, деградации вечной мерзлоты, увеличении числа погодных аномалий и опасных гидрометеорологических явлений (IPCC, 2021; Росгидромет, 2022). Последствия этих процессов провоцируют возникновение климатических рисков, связанных с воздействием изменений в окружающей среде на здоровье человека, сельское хозяйство и землепользование, обеспеченность водными ресурсами, инфраструктуру, городскую среду, туризм и т.д. (IPCC, 2022).

Принятый в 2019 г. «Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г.» (далее – «План первого этапа») основан на понимании того, что Россия сталкивается как с положительными, так и с отрицательными его последствиями (Табл. 1).

Табл. 1. Положительные и отрицательные последствия изменения климата в России, изложенные в «Национальном плане мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года»²

Отрицательные	Положительные
<ul style="list-style-type: none"> - повышение риска для здоровья населения; - рост повторяемости, интенсивности и продолжительности засух в одних регионах, экстремальных осадков, наводнений и опасного для сельского хозяйства переувлажнения почвы – в других; - повышение пожароопасности в лесных массивах; - деградация вечной мерзлоты в северных регионах с ущербом для строений и коммуникаций; - нарушение экологического равновесия, в том числе вытеснение одних биологических видов другими; - распространение инфекционных и паразитарных заболеваний; - увеличение расхода электроэнергии на кондиционирование воздуха в теплый сезон 	<ul style="list-style-type: none"> - сокращение расходов энергии в отопительный период; - улучшение ледовой обстановки и, соответственно, условий транспортировки грузов в арктических морях, облегчение доступа к континентальному шельфу Российской Федерации в Северном Ледовитом океане; - улучшение структуры и расширение зоны растениеводства, а также повышение эффективности животноводства (при выполнении ряда дополнительных условий и принятии определенных мер); - повышение продуктивности бореальных лесов

В марте 2023 г. принят «Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года» («План второго этапа»), содержащий перечень мероприятий по организационному, нормативно-правовому, научно-методическому и информационному обеспечению адаптации³. Предпо-

² Распоряжение от 25 декабря 2019 г. № 3183-р (<http://government.ru/docs/38739/>).

³ Правительство определило меры по адаптации к изменениям климата до 2025 года. 12 марта 2023 г. Распоряжение от 11 марта 2023 года №559-р (<http://government.ru/docs/47971/>).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

лагается, что до 2025 г. должен быть разработан национальный план мероприятий третьего этапа адаптации, содержащий конкретные меры, разработка которых продолжается на отраслевом и региональном уровнях.

К этому моменту встанет вопрос о финансировании адаптационных мероприятий. При этом очевидно, что имеющиеся финансовые и кадровые ограничения в реализации действенных программ адаптации к последствиям изменения климата требуют расстановки приоритетов. Приоритет в реализации адаптационных мероприятий должен принадлежать регионам, которые сталкиваются с наибольшим уровнем климатических рисков и, как следствие, – в наибольшей степени нуждаются в адаптации к ним.

В данном исследовании составлен рейтинг регионов по уровню физических рисков изменения климата и необходимости адаптации к ним для четырех ключевых типов воздействия изменения климата: влияния аномально высокой температуры воздуха на здоровье городского населения, влияния засух на сельское хозяйство, учащения лесных пожаров, таяния вечной мерзлоты. Данные типы климатических воздействий затрагивают наибольшее число регионов и уже сейчас серьезно влияют на население и экономику.

Методология и используемые данные

Для анализа физических рисков, связанных с изменением климата, в данном исследовании используется последовательная оценка воздействия, подверженности и уязвимости. Такой подход, принятый, в том числе, в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2022; Инсаров и др., 2020), позволяет рассматривать зависимость вызванного изменением климата потенциального ущерба (размера физического риска) не только от интенсивности самого изменения климата, но и от специфики конкретных регионов и их адаптационного потенциала.

Воздействие (или «опасность») определяется как «потенциальное возникновение природного или антропогенного физического события или тенденции, которые могут привести к гибели людей, травмам или другим негативным последствиям для здоровья, а также к повреждению имущества, инфраструктуры, мест обитания, услуг, экосистем и экологических ресурсов» (IPCC, 2022).

Подверженность определяется как «присутствие людей, мест обитания, биологических видов и экосистем; экологических функций, услуг и ресурсов; инфраструктуры; или — экономических, социальных или культурных активов в местах, которые могут подвергнуться негативному воздействию» (IPCC, 2022). Другими словами, данная категория относится к населению и производственным или природным активам, которые находятся под угрозой в связи с изменением климата («экспонированы климатическому воздействию»).

Наконец, уязвимость определяется как «склонность или предрасположенность к неблагоприятному воздействию». По сути, это – внутреннее свойство объекта воздействия, которое определяется множеством факторов, включая вос-

приимчивость к воздействию, наличие или отсутствие адаптационного потенциала, резильентность и так далее (IPCC, 2022). Данная категория определяется характеристиками населения и экономических активов, подверженных негативному воздействию.

В данном исследовании будут рассмотрены четыре типа воздействия изменения климата, которые являются одними из наиболее значимых для России⁴: волны тепла, обусловленный изменением климата водный стресс, лесные пожары и таяние вечной мерзлоты.

Для таяния вечной мерзлоты были выявлены регионы, где вечная мерзлота покрывает значительную долю экономически используемых территорий. Используются данные из работ (Порфирьев, Елисеев, Стрелецкий, 2019; Росгидромет 2022). Для трех других видов воздействий на первом этапе анализа по схеме «воздействие – подверженность – уязвимость» на уровне региона были выбраны показатели для количественной оценки интенсивности негативного воздействия, уровня подверженности и уязвимости – соответственно. Перечень таких показателей с обоснованием их выбора и указанием источников данных представлен в соответствующих параграфах. Для оценки показателей подверженности используются данные расчетов с применением 11 климатических моделей проекта CMIP6 (O'Neill et al., 2016). Исходные данные размещены на климатическом портале Всемирного банка и пересчитаны для субъектов Российской Федерации⁵. Для каждого субъекта анализируется изменение мультимодельного среднего за период 2040–2059 г. по сравнению с 1995–2014 г.

Уровень риска, а также необходимость адаптации к нему зависят от сценариев изменения климата, которые, в свою очередь, зависят от сценариев Shared-Socioeconomic Pathways (SSP) (Riahi et al., 2017). В работе (Макаров и Чернокульский, 2023) рассматриваются изменения климатического воздействия согласно четырем сценариям: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (соответствуют ожидаемому росту глобальной температуры к концу XXI в. по сравнению с 1850–1900 гг. на 1,8 °C, 2,7 °C, 3,6 °C и 4,4 °C, соответственно), в данной работе представлены результаты только для сценария SSP1-2.6. Это объясняется стремлением указать на регионы, которые более всего нуждаются в адаптации даже при условии, что изменение климата будет иметь ограниченный характер.

На втором этапе значения выбранных показателей для регионов нормализуются в единичный интервал для дальнейшего корректного сравнения между собой и предотвращения переоценки какого-либо одного в итоговой оценке размера физического риска. На третьем этапе формируются обобщенные показатели воздействия, подверженности и уязвимости как среднее арифметическое всех показателей, относящихся к той или иной составляющей риска. Наконец, итоговый показатель уровня риска рассчитывается как среднее геометрическое трех

⁴ «Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации» под ред. В.М. Катцова. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ).

⁵ World Bank «Climate change knowledge portal. Russian Federation» (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/russian-federation/climate-data-projections>).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

составляющих риска. Использование среднего геометрического означает, что риск будет ниже для тех регионов, для которых какая-то составляющая близка к нулю. Например, если в регионе почти нет лесов (т.е. подверженность лесным пожарам низкая), то необходимость адаптации к данному типу воздействия изменения климата будет крайне низкой, даже если климат меняется в сторону большего благоприятствования лесным пожарам (воздействие растет). Если в регионе много сельскохозяйственных земель (подверженность водному стрессу) высокая, но уровень осадков в нем растет (негативное воздействие изменения климата, касающееся водного стресса, отсутствует), регион не может рассматриваться как нуждающийся в адаптации к водному стрессу.

Регионы в работе ранжируются как на основе относительных значений показателей подверженности (региональный уровень), так и на основе абсолютных значений (национальный уровень).

Влияние волн тепла на здоровье населения

Изменение климата приводит и будет приводить к росту интенсивности и повторяемости событий с аномально высокой температурой воздуха, так называемых «волн тепла», во время которых статистически значимо возрастает смертность населения (Росгидромет, 2022). В данном исследовании в качестве характеристики воздействия используется прогнозируемое изменение числа очень жарких дней и тропических ночей. Два показателя в совокупности достаточно полно отражают уровень воздействия волн тепла в будущем.

Волны тепла затрагивают, в первую очередь, городское население, поскольку в городах они усиливаются за счет эффекта городского «острова тепла» (Росгидромет, 2022). В этой связи городское население рассматривается в качестве показателя подверженности. Однако общая численность городского населения зависит от размера региона. Чтобы устранить эффект зависимости от размера, мы также учитываем долю городского населения в общей численности населения региона.

Влияние волн тепла на городское население крайне неравномерно. К наиболее уязвимым группам относятся пожилые люди; люди, проживающие за чертой бедности, и те, кто страдает хроническими заболеваниями органов дыхания и системы кровообращения (Ревич и др., 2019). Регионы, где эти группы составляют наибольшую долю населения, при прочих равных условиях подвергаются наибольшему риску. Таким образом, мы используем доли этих трех уязвимых групп населения в общей численности городского населения в качестве показателей уязвимости.

На рис. 1 изображены 25 регионов России с самым высоким риском влияния волн тепла на здоровье населения. В качестве показателя подверженности используется как доля городского населения, так и общая численность городского населения. Регионы, выделенные первым способом, отличаются более высоким

уровнем урбанизации, вследствие чего волны тепла здесь могут представлять опасность для значительной части населения. Планы адаптации этих регионов должны в максимальной мере учитывать данный риск. Однако, с позиций страны в целом, наиболее критичными и заслуживающими внимания, с точки зрения разработки планов адаптации на национальном уровне (например, Министерством здравоохранения РФ), являются регионы, где численность городского населения наибольшая в абсолютных значениях.

Большинство регионов с высоким риском волн тепла для здоровья человека расположены в Поволжье, Центре и Юге европейской части России, а также на юге Урала и юге Западной Сибири.

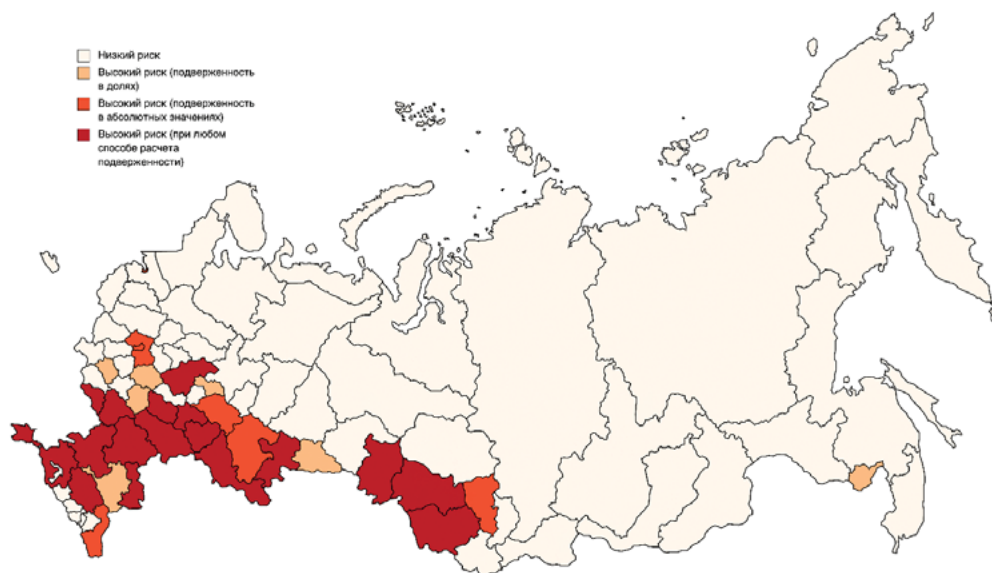


Рис. 1. Регионы-лидеры по необходимости адаптации к водному стрессу. Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.

Влияние засух на сельское хозяйство

Изменение климата приводит к изменению режима выпадения осадков в разных регионах. В частности, наблюдается общий рост осадков в центральных и северных регионах России и их снижение в южных районах. Это снижение проявляется главным образом в теплое время года, в частности, в Южном федеральном округе летняя сумма осадков сократилась с 1976 по 2022 г. на 25%⁶.

В данной работе в качестве ключевого показателя воздействия усиления засушливости климата (усиления водного стресса) принято прогнозируемое процентное изменение летних осадков. Уменьшение количества летних осадков в

⁶ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

результате изменения климата подвергает регионы бóльшей опасности нехватки воды. В то же время имеет значение не только общий уровень осадков, но и их распределение в течение года. Кластеризация осадков (их концентрация в отдельные периоды времени), происходящая в связи с изменением климата, также увеличивает риск засух и, следовательно, потерь в сельском хозяйстве. В связи с этим прогнозируемое изменение максимального числа последовательных сухих дней в году принято в качестве дополнительного показателя воздействия.

Засухи влияют на сельскохозяйственный сектор, снижая стоимость сельскохозяйственных земель, сказываясь на доходах населения, занятого сельскохозяйственной деятельностью, а также снижая добавленную стоимость, которая может быть получена в этой отрасли. В соответствии с этим были выбраны три показателя подверженности: площадь сельскохозяйственных угодий, численность сельского населения и добавленная стоимость, произведенная в секторе сельского хозяйства, лесного хозяйства, охоты, рыболовства и рыбоводства. Данные показатели рассматриваются как в абсолютных, так и в относительных значениях – как доля в общей площади региона, общей численности населения и валового регионального продукта (ВРП) соответственно.

Не все сельскохозяйственные активы в одинаковой степени страдают от одинакового по масштабам усиления водного стресса. Наиболее уязвимы те, которые уже страдают от систематической нехватки воды. Для регионов с такими активами дальнейшее усугубление водного стресса будет вести к тому, что сельское хозяйство начнет сжиматься и перестанет генерировать добавленную стоимость и служить источником занятости. Нынешний уровень обеспеченности водными ресурсами принят в качестве показателя уязвимости.

Рейтинг регионов по размеру обусловленного изменением климата риска водного стресса для сельского хозяйства представлен на рис. 2. При оценке подверженности в долях в рейтинг включаются регионы, которые в большей степени зависят от сельского хозяйства, вследствие чего водный стресс может стать значительным риском для их экономики. Планы адаптации этих регионов должны быть максимально сосредоточены на данном риске изменений климата. Регионы с высоким риском при оценке подверженности в абсолютных единицах заслуживают особого внимания при разработке планов адаптации к изменению климата на национальном уровне (например, Министерством сельского хозяйства РФ).

Большая часть представленных на рис. 2 регионов расположены на юге европейской части страны, в Черноземье, на юге Урала и юге Западной Сибири. В отличие от других рассмотренных в статье типов климатических рисков, в случае водного стресса показатели, отражающие каждую из его компонент – воздействие, подверженность и уязвимость – максимальны примерно в одних и тех же регионах. Другими словами, усугубление водного стресса из-за изменения климата будет самым значительным в регионах, которые специализируются на сельском хозяйстве и уже страдают от нехватки воды. Ростовская область, Краснодарский край и Ставропольский край являются регионами-лидерами России по объему сельскохозяйственного производства, они также являются крупнейшими

регионами-экспортерами зерна. Данные регионы уже сталкиваются с проблемой нехватки воды, и именно они будут подвержены самому серьезному негативному воздействию изменения режима выпадения осадков в будущем.

В несколько меньшей степени это относится и к Черноземью: Воронежская, Белгородская, Тамбовская, Курская и Липецкая области в значительной степени зависят от сельского хозяйства, уже сейчас испытывают дефицит воды и, вероятно, столкнутся с ухудшением водных условий в будущем. Некоторые республики Северного Кавказа (Республики Дагестан, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Чечня, Ингушетия, Адыгея) сталкиваются с аналогичной опасностью, но основной отраслью сельского хозяйства здесь является животноводство, а не производство зерна, что делает их потенциально более адаптивными к растущему водному стрессу. Однако это не относится к югу Урала (Курганская, Оренбургская и Челябинская области, Республика Башкортостан), где на производство зерна приходится значительная доля сельскохозяйственного сектора, и к югу Западной Сибири (Новосибирская область и Алтайский край), которые чрезвычайно богаты сельскохозяйственными угодьями и нередко рассматриваются как будущие крупные российские центры производства зерна для азиатских рынков.



Рис. 2. Регионы-лидеры по необходимости адаптации к водному стрессу. Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.

Учащение лесных пожаров

Увеличение биомассы вследствие роста поглощения углерода лесными экосистемами, изменение режима осадков и рост молниевой активности приводят к учащению и интенсификации лесных пожаров в России (Елисеев, Васильева, 2020). Резкое увеличение площади лесов, потерянных в результате лесных пожа-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ров, также частично связано с общим ухудшением качества управления лесами и недостаточным финансированием мероприятий, направленных на предотвращение пожаров. Лесные пожары являются одним из наиболее частых экстремальных погодных явлений в стране, затрагивающих большую часть ее территории. Лесные пожары также приводят к росту выбросов CO_2 в атмосферу, что ставит под угрозу реализацию стратегии долгосрочного социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов, которая предполагает существенное повышение поглощающей способности лесов⁷.

Риск пожароопасности зависит от температурно-влажностных условий. В связи с этим в качестве показателя воздействия были приняты такие показатели, как число жарких дней ($T_{max} > 25^\circ \text{C}$) и максимальное число последовательных сухих дней весной, летом и осенью. Рассматриваемые в совокупности, данные показатели позволяют достаточно полно оценить уровень опасности, связанной с лесными пожарами, обусловленный изменением климата.

Объем активов, подверженных воздействию лесных пожаров, зависит, в первую очередь, от общей площади лесов в регионе. Однако в значительной степени площадь лесов определяется общей площадью региона. Площадь лесов может быть также рассмотрена как доля в общей площади субъекта федерации с целью устранения зависимости от размера и выявления значимости активов для населения, экономики и экосистем конкретного региона.

Помимо воздействия и подверженности, уровень риска зависит также от уязвимости. Регион может быть покрыт лесами, но по некоторым причинам эти леса могут быть менее уязвимы для лесных пожаров: например, из-за условий ветрового режима, древесного состава, свойств почвы или из-за эффективности политики, направленной на предотвращение лесных пожаров. В качестве обобщающего показателя уязвимости, охватывающего эти и другие переменные, нами принята средняя доля лесных площадей, ежегодно охватываемых лесными пожарами за 2000–2019 гг.

На рис. 3 представлены регионы-лидеры по уровню риска учащения лесных пожаров. При подсчете подверженности в долях выделяются регионы, в большей степени покрыты лесами, и для них, учитывая относительно высокий уровень воздействия и уязвимости, лесные пожары могут представлять *системный риск*. В планах адаптации этих регионов следует уделять большое внимание именно этому риску изменения климата. В то же время среди этих регионов встречаются небольшие по площади регионы (как, например, Республика Марий Эл). С общенациональной точки зрения, относительно высокий риск лесных пожаров, связанных с изменением климата, в этих регионах менее критический, чем в более крупных субъектах федерации, где общая площадь лесов намного больше. Такие регионы заслуживают наибольшего внимания при планировании общенациональных мер адаптации (например, на уровне Рослесхоза).

⁷ Распоряжение от 29 октября 2021 г. № 3052-р «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года»



Рис. 3. Регионы-лидеры по необходимости адаптации к учащению лесных пожаров. Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.

В целом, регионы с высоким риском лесных пожаров расположены вдоль лесного пояса, простирающегося от центра европейской части России до юга Дальнего Востока через центр Урала и Сибири.

Деграция вечной мерзлоты

Повышение температуры в приполярных широтах приводит к изменениям в состоянии криосферы, в частности, к таянию вечной мерзлоты (Anisimov, Zimov, 2020; Росгидромет, 2022). Таяние вечной мерзлоты потенциально представляет собой системный макроэкономический риск для значительной части российской экономики. Она покрывает 65% территории России, на которой проживает 2,5 млн человек (1,7% общей численности населения). На ней расположены важнейшие объекты производственной инфраструктуры, включая трубопроводы, и нескольких крупных промышленных центров.

Ожидаемые изменения несущей способности вечномерзлых грунтов представляют опасность для жилых, промышленных и инфраструктурных объектов, построенных на вечной мерзлоте. Соответствующие потери оцениваются в среднем в 20,71 млрд долл. для жилой инфраструктуры, 16,69 млрд долл. – для промышленной и в 67,67 млн долл. – для транспортной (Росгидромет, 2022). Максимальный ущерб в абсолютных величинах ожидается в Ямало-Ненецком автономном округе, Республике Саха (Якутия) и Красноярском крае, а в процентах ВВП – в Ненецком (5% от ВРП), Чукотском (4,2%) и Ямало-Ненецком (4%) автономных округах.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования



Рис. 4. Регионы России с территорией, покрытой вечной мерзлотой. Составлено на основе (Порфирьев и др., 2019). Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.

Территории, покрытые вечной мерзлотой, расположены в 28 субъектах федерации, однако лишь в девяти регионах (Республика Коми, Республика Саха (Якутия), Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Ханты-Мансийский, Чукотский автономные округа, Красноярский край, Магаданская область, Камчатский край) вечная мерзлота охватывает значительную часть используемой экономической территории (Порфирьев, Елисеев, Стрелецкий, 2019; Росгидромет, 2022). Эти регионы и будут включены в рейтинг в числе наиболее нуждающихся в адаптации к рискам, связанным с таянием вечной мерзлоты.

Основные выводы

Территория России крайне разнородна с точки зрения видов физических рисков, которые несет изменение климата. С одной стороны, это разнообразие определяется географическими особенностями страны, охватывающей регионы от субтропиков до полярных областей. С другой стороны – различиями в экономических и социальных системах и диспропорциями экономического развития. В условиях ограниченности ресурсов (и времени) для осуществления комплексных адаптационных мероприятий, которые дали бы России возможность обеспечить устойчивое к изменению климата развитие на всех частях своей обширной территории, необходимо определить приоритеты в проведении адаптационных мероприятий. Для этого целесообразно выявить регионы, для которых меры, направленные на адаптацию к конкретным рискам, наиболее актуальны, с це-

лью дальнейшей концентрации усилий на планировании и проведении этих мер именно на данных территориях.

В представленном исследовании для составления рейтинга регионов по необходимости адаптации к физическим рискам изменения климата оценены все три составляющих климатического риска – воздействие, подверженность и уязвимость. Проанализированы риски, связанные с четырьмя типами климатического воздействия: рост событий с аномально высокой температурой воздуха (волн тепла), усугубление водного стресса, интенсификация лесных пожаров и таяние вечной мерзлоты. Хотя это – далеко не все климатические риски, влияющие на российскую экономику, они, вероятно, могут иметь наиболее значительное влияние на наибольшее число регионов.

Для оценки последствий таяния вечной мерзлоты выделены регионы, где вечная мерзлота покрывает значительную часть используемой экономически территории. Для других трех типов климатических рисков регионы были ранжированы в соответствии с региональными уровнями воздействия, подверженности и уязвимости.

Обобщающие результаты представлены на рис. 5, 6. На них отмечены регионы, входящие в число 25 лидеров по необходимости адаптации к трем из рассматриваемых видов воздействия (в случае с таянием вечной мерзлоты на картах отмечены десять регионов).

Представленный перечень отражает два разных взгляда на физические риски изменения климата и адаптацию к ним – региональный и национальный. Основное различие заключается в форме представления показателей подверженности. Они могут быть рассчитаны в виде относительных значений, например, доля городского населения в общей численности населения региона, или доля лесных площадей в общей площади, или доля сельского хозяйства в ВРП. В этом случае регионы обозначаются как регионы с высоким риском, если анализируемые климатические воздействия имеют принципиальное значение для их развития. В таких регионах анализируемые климатические риски являются более актуальными, чем для других территорий, а меры адаптации более неотложны для региональных администраций. Данные результаты наиболее актуальны для выработки мероприятий адаптации на уровне региональных органов исполнительной власти.

В то же время ранжирование регионов может осуществляться исходя из показателей подверженности, выраженных в абсолютных значениях (например, общая численность городского населения, общая площадь лесов или общая добавленная стоимость, произведенная в сельском хозяйстве). Более крупные регионы имеют больше шансов попасть в такой рейтинг. Это обуславливает необходимость принимать именно в этих регионах наиболее серьезные меры с целью смягчения последствий проявления данного риска. Таким регионам необходимо наибольшее внимание в рамках разработки национальных мер адаптации к изменению климата. Данные результаты наиболее актуальны для выработки мероприятий адаптации на уровне федеральных органов исполнительной власти.

Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования



Рис. 5. Обобщающий рейтинг регионов: региональный взгляд (подверженность в долях). Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.



Рис. 6. Обобщающий рейтинг регионов: национальный взгляд (подверженность в абсолютных значениях). Карта РФ приведена в границах по состоянию на сентябрь 2022 г.

Анализируемые типы воздействий изменения климата распределены по всей территории России, но каждый из них наиболее характерен для конкретных регионов. Например, таяние вечной мерзлоты является наиболее актуальным климатическим риском в северо-восточных регионах. Лесные пожары характерны для лесного пояса, простирающегося от центра европейской части страны до Центральной Сибири и юга Дальнего Востока России. Аномально жаркие периоды наиболее опасны для населенных урбанизированных территорий центра Европейской части России, но также и для юга Европейской части

страны, юга Урала и юга Западной Сибири. Обусловленное климатическими изменениями усиление водного стресса является ключевой опасностью для юга европейской части, Черноземья, юга Урала и юга Западной Сибири. Во многих регионах может возникать синергетический эффект, – когда риски усиливают друг друга. Например, совместное воздействие аномальной жары и задымления вследствие лесных пожаров на здоровье населения (Ревич, Малеев, Смирнова, 2019).

Воронежская, Московская и Челябинская области являются тремя регионами с высоким риском в отношении одновременно трех типов, связанных с изменением климата опасностей: аномальной жары, водного стресса и лесных пожаров. Весьма вероятно, что если адаптационные меры не будут реализованы, то именно в этих регионах изменение климата принесет наибольшие потери населению и экономике, воздействуя соответственно на здоровье населения, сельское и лесное хозяйство.

Для обусловленного изменением климата усугубления водного стресса характерно наибольшее совпадение регионов, для которых показатели воздействия, подверженности и уязвимости одновременно являются самыми высокими. Это означает, что будущее изменение климата, вероятно, чревато для этих регионов крайне серьезными последствиями. Так, Ростовская область, Краснодарский и Ставропольский края являются крупнейшими производителями зерна в стране. Они уже страдают от нехватки воды, и будущее изменение климата, вероятно, приведет к дальнейшему снижению доступности пресной воды. Игнорирование связанных с изменением климата рисков в этом случае опасно для большого населения и многочисленных компаний и может представлять угрозу для продовольственной безопасности страны в целом.

Совместный учет различных рисков дает основания поднять вопрос об агрегировании полученных оценок по всем факторам риска и составлении сводного рейтинга регионов по необходимости адаптации к изменению климата. В данной работе такая оценка не проводится, так как полный список климатических рисков не исчерпывается четырьмя рассмотренными. Более того, отсутствие сопоставимых оценок экономического ущерба от каждого из видов риска не позволяет определить веса для объединения полученных «частных» рейтингов.

Таким образом, идея составления агрегированного рейтинга регионов может быть воплощена в будущем, если аналогичные рейтинги будут составлены для других видов риска, а ущерб от данных рисков будет оценен в национальном масштабе.

Литература

1. Елисеев А.В., Васильева А.В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2020, Т. 3. С. 73–119. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-73-119
2. Инсаров Г.Э., Мендес К.Л., Семенов С.М., Янда П.З. Концепция риска и визуализация его изменений в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2020, Т. 2. С. 6–34. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-2-06-34

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

3. Катцов В.М, Порфирьев Б.Н. (ред.) Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. М.: Росгидромет, 2011. С. 250.

4. Макаров И.А., Чернокульский А.В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации, 2023, № 4 (61), С. 145–202.

5. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М., Л.: Гослесбу-миздат, 1949. С. 76.

6. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук, 2019, Т. 89. № 12. С. 1228–1239.

7. Ревич Б.А., Малеев В.В., Смирнова М.Д. Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. М.: ИНП РАН, 2019. С. 196.

8. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022. С. 675.

9. Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // *Ambio*, 2020, Vol. 50. Issue 11. P. 1–10. DOI: 10.1007/s13280-020-01392-y

10. IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 2391. DOI: 10.1017/9781009157896

11. IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, Cambridge: Cambridge University Press, 2022. P. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844

12. Kompas T., Pham V.H., Che T.N. The effects of climate change on GDP by country and the global economic gains from complying with the Paris climate accord // *Earth's Future*, 2018, Vol. 8. № 6. P. 1153–1173. DOI: 10.1029/2018EF000922

13. O'Neill B. C., Tebaldi C., Van Vuuren D. P., Eyring V., Friedlingstein P. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscience Model Development*, 2016, Vol. 9. P. 3461–3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016

14. Riahi K., Van Vuuren D. P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B. et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environmental Change*, 2017, Vol. 42. P. 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>



4

**ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ
К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА**

АДАПТАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ И ЭКОНОМИКИ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ В СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ¹

Б.Н. Порфирьев

*Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва
b_porfiriev@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются приоритеты политики в отношении изменений климата в контексте реализации стратегии устойчивого развития на мирохозяйственном уровне и в экономике России. Отмечается, что, несмотря на предусмотренную РКИК ООН и Парижским соглашением равную значимость целей и необходимость сбалансированности усилий по минимизации нетто-выбросов парниковых газов и по адаптации экономики к климатическим изменениям, последняя оказалась отодвинутой далеко на задний план при принятии стратегических решений. Обосновываются императивы, доказывающиеся высокая социально-экономическая эффективность (включая мультипликативный эффект) мер адаптации, выгоды которой в среднем вчетверо превышают затраты. Подчеркивается особая значимость планирования адаптации и реализации мер по снижению потерь и ущерба от изменения климата и его последствий для обеспечения устойчивого долгосрочного социально-экономического развития России. Отмечаются необходимость существенного повышения роли адаптации к климатическим изменениям в системе стратегического планирования (прежде всего, в сфере социально-экономической политики), а также целесообразность разумного использования зарубежного, особенно европейского, опыта планирования адаптации и его интеграции в стратегию устойчивого долгосрочного развития.

Ключевые слова: устойчивое развитие, приоритеты политики, адаптация экономики к климатическим изменениям, национальные планы адаптации, эффективность, декарбонизация экономики

Согласно VI Оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2021), ускоряющиеся с середины прошлого века изменения климата Земли являются беспрецедентными за тысячи,

¹ Работа является существенно расширенной и обновленной версией статьи автора (Порфирьев, 2022).

если не сотни тысяч лет. Вместе с тем, некоторые из уже начавшихся изменений, такие как продолжающееся повышение уровня моря, являются необратимыми для периода от сотен до тысяч лет. Прогнозируется, что в ближайшие десятилетия изменения климата (в первую очередь, глобальное потепление) будут усиливаться во всех регионах мира, сопровождаясь увеличением числа бедных (на 132 млн чел. – уже в следующем десятилетии) и мигрантов (на 216 млн чел. – к 2050 г.) (СОР-26, 2021); нарастанием рисков для здоровья человека (особенно в городах) и устойчивого развития экономики. По нашей оценке, уже в настоящее время полный ущерб от опасных гидрометеорологических явлений и бедствий, наносимый только инфраструктуре развивающихся стран (с низким и средним уровнем доходов), составляет порядка 250 млрд. долл., или около 0,4% их совокупного ВВП. (Рассчитано по (Hallegatte et al, 2019; Rosenberg and Fay, 2019), исходя из интервальной оценки ущерба бизнесу и домашним хозяйствам от выхода из строя или нарушения устойчивого функционирования объектов – от 391 до 647 млрд долл. с учетом оценки доли опасных гидрометеорологических явлений и бедствий в указанной сумме, варьирующей от 10 до 70%).

Ответом на этот глобальный вызов является принятая и развиваемая мировым сообществом климатическая политика, которая за последние почти 30 лет, прошедшие с принятия ее базового стратегического документа – Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК) (UN FCCC, 1992) – превратилась в одну из главных составляющих системы международных отношений и национальных стратегий развития. При этом, сохраняя в качестве целевого ориентира непревышение к концу века по сравнению с доиндустриальной эпохой температурного порога в 2°C (позднее сниженного МГЭИК до 1,5°C), содержание и механизм осуществления этой политики за последние годы претерпели значительную метаморфозу.

Климатические приоритеты стратегии устойчивого развития мировой экономики: адаптация в тени декарбонизации

В принятом в 2015 г. Парижском соглашении по климату (Paris Agreement, 2015), а еще ранее в Климатической доктрине Российской Федерации (Климатическая доктрина, 2009)), один из принципов политики отдельных государств и мирового сообщества в целом в отношении климатических изменений предусматривает равную значимость и необходимость, с одной стороны, интеграции комплекса мер по сокращению нетто-выбросов парниковых газов; и, с другой стороны, адаптации к изменению климата, означающей (UN FCCC, 1992) приспособление природных, социальных или экономических систем к фактическим или ожидаемым климатическим изменениям и их последствиям, предполагающее корректировку процессов, действий или их организации с целью снижения потенциальных рисков или использования благоприятных возмож-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ностей, связанных с изменением климата. В связи с этим все страны, наряду с национальными стратегиями развития с низким уровнем эмиссий парниковых газов, обязаны разрабатывать и осуществлять (в том числе финансировать) национальные планы адаптации (НПА), включающие меры готовности и реагирования населения и экономики на последствия существующих и будущих изменений климата.

Однако на практике паритет между указанными выше двумя стратегическими направлениями действий государств в отношении изменения климата отсутствует. При отведении политике декарбонизации ее адептами роли своеобразных «голубых фишек», адаптации (под предлогом избежания риска дефицита средств, необходимых для радикального и ускоренного снижения эмиссий парниковых газов) чуть ли не с начала 2000-х годов отведена роль падчерицы.

Принятие Парижского соглашения не изменило ситуации. Если в 2015 г. цель достижения нетто-нуля эмиссий парниковых газов была официально закреплена в национальной стратегии лишь одного государства страны (Королевства Бутан), то уже в 2021 г. число таких стратегий (и стран) превысило 90, а в 2023 г. достигло 101. В то же время в 2015 г. НПА разрабатывались в нескольких странах мира, в 2021 г. – были приняты в более чем 70 государствах мира, в том числе в 41 развивающейся стране, что составило менее 30% от общего числа таких стран-участниц РКИК ООН (142). При этом лишь четверть принятых планов включала оценки рисков текущих и будущих изменений климата или предусмотрели в этих НПА реальные меры снижения ущерба. Порядка 10% развивающихся стран в указанном году даже не начинали разработку НПА, более 60% – объявили о начале работы над НПА (UNEP Adaptation Gap Report, 2020). Особенно сложная ситуация в странах Африки, из которых только шесть (менее 11%) представили свои НПА в секретариат РКИК ООН (State and Trends in Adaptation Report, 2021, p. 29). Положение дел несколько улучшилось в 2023 г., когда рекордное число (11) развивающихся стран представило свои НПА в секретариат РКИК, тем самым увеличив их общее количество до 52, а их долю среди развивающихся стран-сторон РКИК ООН – почти до 37% (Record number, 2023), но отрыв от политики декарбонизации остается внушительным.

Еще больший диспаритет наблюдается в сфере климатического финансирования. В 2015/2016 г. совокупные государственные расходы развивающихся стран на адаптацию (включая внутренние затраты, а также затраты в рамках двусторонних и многосторонних программ, в том числе программы экономической помощи), составили 22 млрд. долл.; увеличившись в следующем году до 30 млрд долл.; в 2018/2019 г. – до 49 млрд долл. (Richmond et al, 2021; Global Landscape of Climate Finance, 2023, p. 27; State and Trends in Adaptation Report, 2020, p. 6). Отметим, что по другой оценке (UNEP Adaptation Gap Report, 2020) эта сумма была существенно больше – около 70 млрд долл.; и, в то же время, есть и иные, существенно меньшие оценки, в частности одного из крупнейших мировых перестраховщиков, компании *Swiss Re*, согласно которым в 2020 г. эта сумма составила всего 28,6 млрд долл. (Build a better future, 2023). Существен-

ное расхождение может быть объяснено разными методиками расчета. В том числе, включением или, напротив, исключением из расчетов затрат на меры «двойного назначения», способствующие как адаптации, так и снижению нетто-выбросов парниковых газов. Согласно (Global Landscape of Climate Finance, 2023, p. 27), в 2022 г. такие затраты оценивались в 51 млрд долл., лишь на 19% уступая расходам на адаптацию.

Совокупные государственные расходы развивающихся стран на адаптацию (как таковую) в том же 2022 г. составили 63 млрд долл. (Richmond et al, 2021; Global Landscape of Climate Finance, 2023, p. 27; State and Trends in Adaptation Report, 2020, p. 6). Это менее 0,16% совокупного ВВП развивающихся стран, всего 4,8% от их суммарных расходов на климатическое финансирование и в 18 раз меньше, чем затраты на декарбонизацию и достижение углеродной нейтральности к середине века.

Аналогичным образом выглядит указанный контраст в терминах вложений (ресурсов) в глобальные фонды, ориентированные на поддержку инвестпроектов в сфере декарбонизации – 12,8 млрд долл. от Зеленого климатического фонда (*Green Climate Fund*) – и проектов в сфере адаптации – 700 млн и 192,3 млн долл. от Фонда потерь и ущерба (*Loss and Damage Fund*) и Фонда адаптации (*Adaptation Fund*), соответственно (State of Global Environmental Governance, 2023, p. 11). Разрыв составляет более 14 раз, а на адаптацию приходится – менее 6,5% от суммарных ресурсов указанных климатических фондов в 2023 г.

Что существенно важнее – это то, что объемы финансирования адаптации многократно меньше тех, которые требуют реалити последствий климатических изменений, смягчение которых необходимо для обеспечения устойчивого развития в обозримом будущем. Исходя из оценки международной НКО *Climate Policy Initiative* (Global Landscape of Climate Finance, 2023, p. 27) мировые потребности в финансировании адаптации за период 2023-2030 г. оцениваются в 1,48 трлн долл. или 212 млрд долл. в среднем в год; в 2030-2050 гг. – 4,78 трлн долл. или 239 млрд долл., соответственно. Разрыв между указанными потребностями и фактическим объемом финансирования адаптации в 2022 г. варьирует в интервале 3,4-3,8 раза.

Согласно другим оценкам, эта величина может быть еще больше: так, в докладе Глобального центра по адаптации (State and Trends in Adaptation Report, 2020, p. 6), исходя из оценки потребностей в адаптации в 140-300 млрд долл. в среднем в год за период 2020-2030 гг., указанный разрыв полагается 5-10 кратным и, с течением времени только увеличивается, что влечет за собой снижение потенциала адаптации к изменяющемуся климату не только населения и экономики, но и основы их существования и функционирования – природных экосистем. Как отмечается в резюме VI Оценочного доклада МГЭИК (2022), многие из них требуют для восстановления этого потенциала серьезных капиталовложений, а ряд экосистем (например, Арктические, прибрежные водно-болотные угодья и др.) уже достигли предела, понеся безвозвратные потери в биоразнообразии, и далее не способны адаптироваться (IPCC, 2022, p. 27).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Учитывая это, необходимо кратное увеличение затрат развивающихся стран на адаптацию на период до 2030 г., затем до 2050 г., чтобы преодолеть указанный ранее разрыв в финансировании, что позволит смягчить ущерб в средне- и долгосрочной перспективе, но не устранить вышеупомянутые угрозы миру. По прогнозу экспертов ЮНЕП от 2022 г. (UNEP Adaptation Gap Report, 2022), затраты развивающихся стран на адаптацию в 2030 г. могут возрасти до суммы от 160 до 340 млрд долл. или, в среднем, до 250 млрд долл. в год; а в 2050 г. – до 565 млрд долл. в среднем в год (что заметно превышает приведенные ранее оценки международной НКО *Climate Policy Initiative* потребностей адаптации в 212 и 239 млрд долл., соответственно).

Однако даже в этом оптимистичном сценарии разрыв в финансировании остается внушительным: учитывая, что по авторитетной оценке экспертов (Markandya and González-Eguino, 2019) по трендам 2018 г., величина социально-экономического ущерба к 2030 г. может варьировать от 290 млрд до 580 млрд долл. (средняя 435 млрд долл.) и к 2050 г. удвоиться (до 1,7 трлн долл.) он (разрыв) достигает 1,7 и 3 раза, соответственно, а в абсолютных величинах – 185 млрд долл. в 2030 г. и более 1,1 трлн долл. в 2050. При этом предполагается, что величины ущерба на 2030 и 2050 г., представленные в вышеупомянутом прогнозе от 2018 г., останутся на том же уровне, хотя, на самом же деле, масштабы ущерба наверняка возрастет, как из-за ухудшения климатической ситуации, так и из-за усугубляющегося разрыва в финансировании адаптации (так называемого дефицита адаптации).

При этом экономика развивающихся стран будет испытывать дополнительное бремя, связанное с нежеланием ЕС и США принять на себя реальные обязательства финансового содействия в преодолении ухудшающихся последствий изменения климата развивающимся странам, ожидающим (в соответствии с установками Парижского соглашения) такого содействия со стороны развитых государств еще с 2001 г. (The Global Risks Report 2022, p. 18). Хотя на COP-28 в Дубаи в 2023 г., соответствующие обязательства, наконец, формально были приняты, однако то, как они будут исполняться реально, вызывает закономерные опасения, учитывая предшествующий опыт более чем 20-летней задержки, а также предлагаемые далеко не бесспорные схемы финансирования.

В частности, сомнения вызывает инициатива организации «глобального щита» (Global Shield), которая была представлена на COP-27 как совместная инициатива государств G7 и V20 (наиболее уязвимые страны, потерявшие с 2000 г. 525 млрд долл. из-за последствий изменений климата.; реально сюда входит 58 стран, в том числе из ЕврАзЭС – Кыргызстан), которая предусматривает схемы страхования, обеспечивающие оперативное и систематическое оказание помощи наиболее бедным странам, пострадавшим от климатических бедствий. Первыми получателями пакетов Global Shield, стали Бангладеш, Коста-Рика, Фиджи, Гана, Пакистан, Филиппины и Сенегал. Целый ряд экспертов рассматривают данный механизм как новую попытку богатых стран не платить за ущерб от последствий климатических бедствий в бедных странах, увести внимание мирового сообще-

ства в сторону от создания специального механизма финансирования убытков и ущерба, который требуют страны с низким и средним уровнем дохода, и переложить бремя на жителей более бедных стран за счет их же страховых взносов. При этом не принимается во внимание или недооценивается растущий ущерб от бедствий, что делает страхование все более затруднительным и/или дорогостоящим даже в развитых странах, где страховка покрывает только небольшую часть потерь, причем лишь от некоторых видов климатических бедствий (внезапных, таких как штормы, засухи и лесные пожары, но не «постепенных» как опустынивание и повышение уровня моря). В развивающихся странах, где страхование для большинства людей недоступно, не говоря уже о бюрократических препонах с заполнением форм, открытием банковских счетов и общением с официальными лицами, необходимыми для оформления страховки, а затем получения выплат, и – главное – отсутствием финансирования, ситуация намного хуже; и вышеупомянутый «глобальный щит», действительно, выглядит, образно говоря, дырявым.

Дефицит финансирования является важной, но не единственной проблемой преодоления разрыва между потребностями и реальными усилиями в области адаптации. Два других вызова связаны, во-первых, с эффективностью инвестиций в адаптацию. Последняя в существенной степени определяется их целевой направленностью, прежде всего соотношением затрат на меры превентивной адаптации, направленные на смягчение ожидаемого ущерба и потерь от будущих последствий изменений климата; и меры оперативной адаптации, обеспечивающие снижение актуальных ущерба и потерь, обусловленных текущими эффектами опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций природно-климатического характера. Показательна в этом отношении ситуация в Австралии, которая, по оценкам, за последние 20 лет страна израсходовала на аварийно-спасательные и инженерно-восстановительные работы почти в 50 раз больше, чем на сооружение более прочных и устойчивых домов и инфраструктуры (Extreme weather, 2022).

Во-вторых, существующие стратегии и программы действий серьезно недооценивают роль и значимость природного потенциала (так называемых природных решений, *natural based solutions*) в снижении уязвимости и повышении устойчивости населения и экономики к негативным последствиям климатических изменений и по использованию благоприятных возможностей, которые возникают в связи с этими изменениями. Главная ставка делается на инженерные и технологические решения, что, помимо прочего, обходится значительно дороже и, соответственно усугубляет вышеупомянутый дефицит финансирования адаптации. Так, в той же Австралии правительство «борется [с изменениями климата и их последствиями] наиболее простыми средствами, сооружая дамбы (плотины), поднимая дома над поверхностью земли и тратя огромные средства на расчистку завалов [после бедствия]» (Extreme weather, 2022).

При этом сам «технократический» подход к адаптации, по сути, аналогичен или близок к таковому в национальных стратегиях развития с низким уровнем эмиссий парниковых газов, которые в 2020-х г. в подавляющем большинстве

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

стран трансформировались в так называемые «углерод-нейтральные или нетто-нулевые (net zero)», предусматривающие достижение к 2050 г. нулевого баланса между эмиссиями парниковых газов и их поглощением. В этих стратегиях адаптация упоминается, в лучшем случае, вскользь. Показательны доклады крупнейших мировых бизнес-консультантов *McKinsey, Boston Consulting Group* и Всемирного экономического форума (*The Net-Zero Transition, 2022; Winning the Race to Net Zero, 2022*), в первом из которых во введении сделана оговорка о том, что работа имеет ряд ограничений, в том числе не рассматриваются вопросы адаптации, а во втором тема адаптации просто проигнорирована. Те же эксперты, которые выступают за активное использование управления экосистемами как «естественный, природный» способ решения климатической проблемы, подчеркивают его приоритет для снижения нетто-выбросов парниковых газов, отодвигая адаптацию далеко на задний план. Так, в докладе по этой теме двух институтов, подготовленном для Министерства охраны окружающей среды Германии, адаптации не посвящено ни одного раздела, а термин «adaptation» упоминается почти на порядок реже термина «mitigation» (Reise et al, 2022).

Вызовы и перспективы адаптации российской экономики к климатическим изменениям

Определяемая ведущими экономиками мира, прежде всего ЕС, глобальная климатическая повестка с ярко выраженной асимметрией в пользу стратегии декарбонизации и углеродной нейтральности экономики и с существенной недооценкой адаптации оказывает значительное влияние на формирование институциональной среды, в которой осуществляется разработка политики в отношении климатических изменений на уровне конкретных государств. В том числе, России, что видно, в частности, из названия утвержденного в 2016 г. правительством плана реализации Парижского соглашения (План реализации, 2016), в котором фигурируют меры госрегулирования только выбросов парниковых газов), а также из содержания этого плана и практики его осуществления в 2017-2021 гг. Из восьми указанных в нем внутрirosсийских институциональных мер госрегулирования лишь одна относится к адаптации (причем исключительно к неблагоприятным изменениям климата), и предусматривает при этом разработку национального плана адаптации (НПА) до конца 2018 г. (Всего в плане содержится 12 мероприятий, три из которых связаны с вопросами ратификации Парижского соглашения и его макроэкономических последствий, одно – с ее внешнеэкономическими и внешнеполитическими аспектами. Еще семь мероприятий относятся к госрегулированию снижения эмиссий парниковых газов).

К началу 2024 г. НПА как единый (целостный) документ стратегического планирования не был разработан. Вместо него распоряжениями правительства России были приняты так называемые национальные планы мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г. и второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2024 г., предусматривавшие, соответ-

ственно, разработку институциональной базы и принятие 10 отраслевых планов адаптации, а также региональных планов адаптации (Национальный план мероприятий, 2022; Национальный план мероприятий, 2024).

Оставляя за скобками оценку качества этих планов (которая является самостоятельным важным предметом, причем не одного исследования, часть которых выполнена в рамках работы автора и его коллег по реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ (ВИП ГЗ), утвержденного Распоряжением Правительства РФ от 02.09.2022 № 2515-р – подробнее о проекте см. «Проблемы прогнозирования», 2023, № 6), обратим особое внимание на два приоритета Климатического пакта Глазго, принятого на COP-26 в ноябре-декабре 2021 г. (Glasgow Climate Pact 2021; COP 26 Reaches Consensus, 2021), которые очень важны для России, прежде всего, с точки зрения необходимости мощного укрепления научной базы климатической составляющей политики устойчивого развития: (1) наилучшие научные знания для эффективных действий в отношении изменений климата и разработки соответствующей политики, и (2) адаптация и финансирование мер адаптации..

По оценкам экспертов Всемирного банка, достоверное точное знание пространственного распределения рисков опасных гидрометеорологических явлений и бедствий может помочь сконцентрировать усилия на адаптации уязвимых объектов инфраструктуры, тем самым уменьшив ожидаемый в развивающихся странах в период до 2050 г. ущерб в 2-3 раза, а их издержки на меры защиты – на порядок, сократив их за тот же период со 120-670 млрд долл. до 11-65 млрд долл. в среднем в год. Таким образом, вложения в науку, в том числе в высокотехнологичные системы дистанционного зондирования Земли и современные климатические модели, оказываются высокоэффективными, помогая сберечь не менее 200 млрд долл. в среднем в год. (Рассчитано по: (Hallegatte et al, 2019, p. 105-106)).

Что касается собственно адаптации, приоритет для России обусловлен, прежде всего, повышенной уязвимостью ее населения и экономики (особенно ее инфраструктуры) к последствиям потепления, скорость которого в целом по нашей стране почти вдвое, а в обширном и стратегически важном Арктическом регионе – в 2,5-3 раза выше, чем в среднем по миру. Ожидаемый в 2020-2050 гг. ущерб только от деградации многолетнемерзлых грунтов и только для муниципалитетов Арктической зоны РФ оценивается экспертами в 5-7 трлн руб. (Мельников и др., 2021) или, в среднем, в 200 млрд руб. в год. Особо уязвимой оказывается инфраструктура, прежде всего дорожная, а также социальная (жилье и объекты системы здравоохранения), на обеспечение адаптации которых к последствиям климатических изменений может потребоваться дополнительно не менее 50 млрд руб. в среднем в год. (Рассчитано по: (Porfiriev et al, 2019; 2022a,б)).

Для устойчивого развития и национальной безопасности России принципиально то, что эффекты снижения климатических рисков для населения и эко-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

номики в результате мер адаптации полностью и практически сразу (или с минимальным лагом) реализуются на территории нашей страны (снижая риски для здоровья и благосостояния жителей, а также для хозяйственных объектов в климатически уязвимых регионах) и способствуют экономическому росту. Это существенно отличает эти эффекты от таковых в результате мер по декарбонизации экономики, которые реализуются со значительным лагом и распределяются по всему миру, причём неравномерно. Если эффективность мер декарбонизации, являющейся стержнем Стратегии-2050 и ее зарубежных аналогов, окажется низкой, то интенсивность климатических изменений и масштабы их воздействия на экономику, согласно прогнозам МГЭИК, возрастут. При этом адаптация окажется единственным инструментом защиты от природно-климатических бедствий, превратившись в «страховщика» последней инстанции.

Подчеркивая значимость адаптации, новый Генеральный секретарь ВМО, профессор С. Сауло, на инаугурационном брифинге для СМИ в ООН в Женеве в январе 2024 г. отметила: «Адаптация к меняющемуся климату — это не выбор, а насущная необходимость» (WMO Secretary-General, 2024). Кроме того, инвестиции в адаптацию, во-первых, беспроигрышны — имеется в виду их социально-экономическая целесообразность, независимо от климатического сценария экономической политики. Это обусловлено, прежде всего, ориентацией указанных инвестиций на меры поддержки природных экосистем (лесов, водно-болотных угодий), которые в существенной мере помогают смягчить негативные последствия изменений климата, а также меры по снижению риска и защите населения и хозяйственных объектов от природных опасностей и бедствий (системы раннего оповещения, инженерной защиты и т.д.). Во-вторых, инвестиции в адаптацию высокорентабельны, что связано с их мультипликативным эффектом, нередко именуемым «тройным дивидендом» адаптации. Он включает: (1) снижение ожидаемых человеческих потерь и экономического ущерба; (2) обусловленные снижением указанных рисков, созданием новых рабочих мест и внедрением инноваций генерацию дополнительных доходов и рост производительности; (3) выгоды экологического и культурного характера, в частности, для рекреации и туризма.

По оценке экспертов Всемирного банка, Глобальной комиссии по адаптации и Института мировых ресурсов, в 2019 г. ежегодные совокупные инвестиции стран мира в адаптационные меры в размере 1,8 трлн долл. приносят выгоды в виде предотвращенных убытков и затрат в 7,1 трлн долл. (Hallegatte et al, 2019, p. 105-106; Adapt Now, 2021, p. 3-4). Таким образом, единица таких вложений в среднем дает снижение ущерба на четыре единицы (в стоимостном выражении), не считая дополнительных доходов от создания новых рабочих мест, спроса на продукцию смежных производств и других мультипликативных эффектов. Это же или близкое к нему соотношение показывают результаты исследований, в частности известного эксперта из ИИАСА Р. Мехлера, а также проф. И. Петкова из Северо-Восточного университета США (Mechler, 2016; Petkov, 2023). В них обосновывается эффективность государственных затрат на адаптацию, которая

оценивается через соотношение инвестиций и выгод (предотвращения потерь) составляет как 4 : 1 и 3 : 1, соответственно, для национального уровня (развитых стран) и уровня округов США (в последнем случае оно относится к 20-летнему периоду). При этом, данные по США свидетельствуют о том, что федеральные расходы наиболее эффективны в районах с высоким уровнем риска, местные расходы – в районах со средним уровнем риска.

Приведенные выше оценки эффективности представляют собой средние величины, которые на практике существенно варьируют в зависимости от: а) вида природной опасности, б) типа общественной системы и уровня экономического развития; в) вида (категории) мер адаптации; д) длительности действия эффекта защиты объекта воздействия. Так, соотношение выгод и инвестиций в адаптацию к последствиям наводнений и волн жары для разных стран варьирует от 2 : 1 до 10 : 1. При этом наибольший эффект характерен для стран с низкими уровнями доходов, в том числе Африки (Gray et al, 2023). На самом «черном континенте» наиболее эффективными являются инвестиции в развитие систем информации о погоде и климате (соотношение выгод и затрат варьирует от 4:1 до 25:1), в комплекс мер по снижению риска бедствий (от 2:1 до 24:1), по использованию засухоустойчивых сортов экспортных зерновых (от 2:1 до 14:1) и обеспечению населения чистой питьевой водой и санитарией (от 2:1 до 12:1) (State and Trends in Adaptation Report, 2021, p. 27).

Что касается видов мер и эффектов адаптации, хорошо известный способ смягчения последствий наводнения как мешки с песком оправдано в краткосрочном плане, но неэффективно в долгосрочном плане и потому не используется. Отдача от инвестиций в развитие систем раннего оповещения об опасных природных явлениях и бедствиях оценивается как 10:1; в меры защиты прибрежной кустарниковой растительности (мангры и др.) – 6:1; в обеспечение устойчивости к погодно-климатическим воздействиям новых (строящихся, проектируемых) инфраструктурных объектов, а также в совершенствование технологий выращивания зерновых культур на засушливых землях – 5:1. Однако такая эффективность достигается только в том случае, если планирование адаптации и реализация соответствующих мер производятся своевременно. По оценкам экспертов Всемирного банка, в условиях ускоряющихся климатических изменений затягивание принятия инвестиционных решений на 10 лет увеличивает издержки на адаптацию в среднем по группе развивающихся стран (с низкими и средними доходами) вдвое (Hallegatte et al, 2019, p. 105-106).

Важную роль, особенно на главном, местном (районном) уровне адаптации, играют социально-психологические факторы, которые могут способствовать либо, напротив, ограничивать затраты на эти цели. Так, отсутствие единства или кооперативности местных жителей в оценке приоритетов действий в отношении последствий изменения климата может сдерживать расходы на адаптацию, прежде всего в округах с большим разнообразием политических предпочтений, особенно в тех там, где мнения жителей (по поводу адаптационных мер) делятся примерно поровну (Petkov, 2023).

Повышение роли адаптации экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития России: приоритет национальных интересов и использование зарубежного опыта

Опыт последних лет позволяет извлечь уроки, сколь необходимые, столь и полезные, для обеспечения устойчивого социально-экономического развития страны на долгосрочную перспективу. Императивом принятия решений в области климатической политики при всех сценариях должен быть приоритет национальных интересов, интегралом которых выступает повышение качества жизни людей и гарантии национальной безопасности, причем во всех ее измерениях (политическом, социальном, экономическом, в том числе энергетическом, и т.д.).

С этой точки зрения, поддерживая обоснование и выбор в качестве приоритета Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (Стратегия, 2023) ее целевого сценария, ключевой задачей которого являются «обеспечение глобальной конкурентоспособности и устойчивого экономического роста Российской Федерации в условиях глобального энергоперехода» и «взаимная увязка целей международной климатической повестки по снижению выбросов парниковых газов, экономических возможностей страны по переходу на технологии с низким уровнем выбросов парниковых газов и обеспечение национальных интересов социально-экономического развития», необходимо качественно усилить положения упомянутой стратегии, а также Определяемого на национальном уровне вклада России в реализацию Парижского соглашения (Определяемый на национальном уровне вклад, 2022) в части, связанной с адаптацией населения и экономики к изменениям климата и их последствиям. Подчеркнем, что в данном случае речь идет только об усилении увязки мер декарбонизации и адаптации (которая, согласно модельным расчетам, в том числе экспертов ОЭСР, обеспечивает наилучший экономико-климатический эффект), а не об адаптации как самостоятельном стратегическом направлении национальной климатической политики со своей институциональной базой (включая, но не ограничиваясь национальным планом адаптации, НПА).

Что касается собственно адаптации населения и экономики к изменениям климата, прежде всего, разработки и реализации (НПА), работа по данному важнейшему стратегическому направлению политики страны должна получить качественно иной статус, как минимум, не уступающий Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. При этом, твердо придерживаясь национальных интересов, России полезно в полной мере использовать потенциал современной системы международных экономических и политических отношений, которая содержит в себе не только многочисленные риски, но и ряд возможностей.

Прежде всего, речь идет о мировом опыте планирования и реализации планов адаптации населения и экономики к климатическим изменениям. Из имеющихся в мире семи с небольшим десятком НПА эффективные меры предусмотрены менее чем в половине из них, в том числе – в НПА стран-членов Евросоюза, который в 2021 г. принял также новую стратегию адаптации (*Forging a climate-resilient Europe*, 2021). Указанная стратегия – органическая часть Европейского зеленого курса (*European Green Deal*), известного отечественным экономистам и политикам по предусмотренным им неоправданно жестким (и потому активно и справедливо критикуемым) мерам углеродного регулирования трансграничной торговли (*СВАМ*), в том числе с Россией. В отличие от этой составляющей Европейского зеленого курса, содержащей ощутимые риски для отечественной экономики, новую стратегию адаптации ЕС целесообразно рассматривать как международный опыт, полезный для развития стратегического планирования в целом и климатической политики в России, в частности. Особого внимания заслуживают целевая установка указанной стратегии и соответствующие институты, направленные на достижение интегральной устойчивости развития ЕС к 2050 г. К этому периоду времени, наряду с достижением «климатической» (углеродной) нейтральности экономики планируется сведение к минимуму ее уязвимости к неустраняемым последствиям изменений климата, укрепление адаптационного потенциала и выход на мировое лидерство в сфере адаптации (*Forging a climate-resilient Europe*, 2021).

Кроме зарубежного опыта планирования адаптации, России необходимо максимально использовать имеющиеся (к сожалению, не столь многочисленные, как бы хотелось) возможности международного взаимодействия (сотрудничества). Имеются в виду возможности, в том числе, в рамках СОР (МГЭИК), например, связанные с запуском, по решению СОР-26, двухлетней «Рабочей программы Глазго – Шарм-эс-Шейх», посвященной выработке глобальной цели по адаптации и путям ее достижения (*Glasgow-Sharm el-Sheikh Work Program*, 2021). Одним из приоритетов являются природные решения, связанные с сохранением и восстановлением экосистем, как наземных, так и морских. Учитывая, что в качестве одной из основ программы рассматривается VI Оценочный доклад МГЭИК, второй том которого посвящен воздействию изменений климата на население и экономику и мерам адаптации (IPCC, 2022), представляется целесообразным использовать аналогичный подход. Имеется в виду принятие III Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Третий оценочный доклад, 2022) и развивающих его ключевые положения далее исследований ученых Росгидромета и РАН в качестве научной основы планирования и реализации мер адаптации на всех уровнях принятия решений по обеспечению устойчивого социально-экономического развития России.

На макроэкономическом (федеральном) уровне речь идет, прежде всего, об интеграции планирования мер адаптации в разработку и совершенствование двух ключевых документов стратегического планирования (Стратегии долго-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

срочного социально-экономического развития России и Стратегии пространственного развития России), учитывая существенно неравномерные и растянутые во времени, а также территориально дифференцированные эффекты воздействия климатических факторов и разную степень уязвимости к ним различных групп населения и секторов экономики. Конкретные планы и основные усилия по адаптации – прерогатива отраслевых ведомств и, в первую очередь, регионов – органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

Литература

1. Порфирьев Б.Н. Декарбонизация versus адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования, 2022, №4, с. 45-54.
2. IPCC, 2021: Summary for Policymakers / Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
3. COP 26: The-world-is-watching. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/10/31/cop26-the-world-is-watching>
4. Hallegatte S., Rentschler J. and Rozenberg J. Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity. Sustainable Infrastructure Series. Washington, DC: World Bank, 2019. 224 p.
5. Rozenberg J., and Fay M. Beyond the Gap: How Countries Can Afford the Infrastructure They Need While Protecting the Planet. Washington, DC: World Bank, 2019. 199 p.
6. United Nations Framework Convention on Climate Change (UN FCCC). NY: United Nations, 1992. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
7. Paris Agreement (accepted by the UN FCCC 21st session on 12 December 2015 г.). URL: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf
8. Климатическая доктрина Российской Федерации. 17.12.2009. URL: <http://en.kremlin.ru/supplement/4822>
9. UNEP Adaptation Gap Report 2020. Executive Summary. Nairobi: UNEP, 2020. 12 p. URL: <https://www.unep.org/adaptation-gap-report-2020>
10. State and Trends in Adaptation Report 2021: Africa. Rotterdam: Global Center on Adaptation, 2021. 43 p.
11. Record number of national adaptation plans submitted in 2023 but more are needed. <https://unfccc.int/news/record-number-of-national-adaptation-plans-submitted-in-2023-but-more-are-needed> (accessed on 13 December 2023)
12. Richmond M., Meattle C., Micale V., Oliver P. and Padmanabhi R. A Snapshot of Global Adaptation Investment and Tracking Methods. CPI Report. April 2020. 21 p. URL: www.climatepolicyinitiative.org

13. Global Landscape of Climate Finance 2023. Climate Policy Initiative. San Francisco (USA), 2023. – 56 p.

14. Build a better future. <https://www.swissre.com/our-business/public-sector-solutions/adapting-to-a-changing-climate.html> (accessed on 23 December 2023)

15. State of Global Environmental Governance 2023. IISD and Earth Negotiations Bulletin: March 2024 – 38 p.

16. IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33.

17. UNEP Adaptation Gap Report 2022. URL: <https://www.unep.org/adaptation-gap-report-2022>

18. Markandya, A., González-Eguino, M. (2019). Integrated Assessment for Identifying Climate Finance Needs for Loss and Damage: A Critical Review. In: Mechler, R., Bouwer, L., Schinko, T., Surminski, S., Linnerooth-Bayer, J. (eds) *Loss and Damage from Climate Change. Climate Risk Management, Policy and Governance*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72026-5_14

19. The Global Risks Report 2022. 17th Edition. Davos: World Economic Forum, 2022.

20. Extreme weather is making parts of Australia uninhabitable. <https://www.economist.com/asia/2022/12/20/extreme-weather-is-making-parts-of-australia-uninhabitable> (accessed on 22 December 2022)

21. 21 The Net-Zero Transition. What It Would Cost, What It Could Bring. Report. McKinsey and Company, January 2022. 224 p.

22. 22 Winning the Race to Net Zero: The CEO Guide to Climate Advantage. Insight Report. World Economic Forum in collaboration with Boston Consulting Group. Davos, January 2022. 37 p.

23. 23. Reise J., Siemons A., Böttcher H., Herold A., Urrutia C., Schneider L., Iwaszuk E., McDonald H., Ana Frelih-Larsen A., Duin L. and Davis M. *Nature-Based Solutions and Global Climate Protection – Assessment of Their Global Mitigation Potential and Recommendations for International Climate Policy*. Policy paper. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, January 2022. 81 p.

24. План реализации комплекса мер по совершенствованию государственного регулирования выбросов парниковых газов и подготовки к ратификации Парижского соглашения, принятого 12 декабря 2015 г. 21-й сессией Конференции Сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (утвержден Распоряжением Правительства РФ от 3 ноября 2016 г. № 2344-п. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71432434/#0>)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

25. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г. Утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-п <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/ALzCFp4EbLAKAEuDwZpAxQ1W0QeI3mGT.pdf>

26. Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г. Утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 марта 2023 г. № 559-п <http://government.ru/docs/47971/>

27. Glasgow Climate Pact 2021. UNFCCC Decision - CP.26. URL: <https://unfccc.int/documents/310475>

28. COP26 Reaches Consensus on Key Actions to Address Climate Change. UN Climate Press Release. 13 November 2021. URL: <https://unfccc.int/news/cop26-reachesconsensus-on-key-actions-to-address-climate-change>

29. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 1. С. 14-31.

30. Porfiriev, B., Eliseev, D. and Streletskiy, D. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Road Infrastructure Sustainability under Climate Change in the Russian Arctic // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. Vol. 89. No. 6. Pp. 567-576.

31. Porfiriev, B., Eliseev, D. and Streletskiy, D. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on the Housing Sector in the Russian Arctic // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2021. Vol. 91. No. 1. Pp. 17-25.

32. Porfiriev, B., Eliseev, D. and Streletskiy D. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Healthcare Facilities in the Russian Arctic // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2021. Vol. 91. No. 6. Pp. 677-686.

33. WMO Secretary-General Celeste Saulo addresses journalists. <https://wmo.int/ru/node/22467> (accessed on 30 January 2024)

34. Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience September 2019. Rotterdam: Global Commission on Adaptation and Washington: World Resources Institute, 2019. URL: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Global_Commission_Report_FINAL.pdf.

35. Mechler, R. Reviewing estimates of the economic efficiency of disaster risk management: opportunities and limitations of using risk-based cost-benefit analysis. // Nature Hazards 81, 2121–2147 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2170-y>

36. Petkov, I. Public Investment in Hazard Mitigation: Effectiveness and the Role of Community Diversity // Economics of Disasters and Climate Change 7, 33–92 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41885-022-00119-Swiss> Re Institute We need to talk about climate adaptation.

37. Gray, C., Ou, N., Gahlo, S. We need to talk about climate adaptation. Swiss Re Institute. Geneva, 2023. – 8 p.

38. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р. <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf>

39. Определяемый на национальном уровне вклад Российской Федерации в рамках реализации Парижского соглашения от 12 декабря 2015 года. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/NDC_RF_ru.pdf

40. Forging a climate-resilient Europe – the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. European Commission: Brussels, 24.2.2021 COM (2021) 82 final/. URL: <https://www.europeansources.info/record/forging-a-climate-resilient-europe-the-new-eu-strategy-on-adaptation-to-climate-change/>

41. Glasgow – Sharm el-Sheikh Work Program on the Global Goal on Adaptation. Decision -/CMA. Advance unedited version. (2021) URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GGA_AUV.pdf

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

КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Б.А. Ревич

Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва
brevich@yandex.ru

Аннотация. Представлен обзор исследований по оценке воздействия климатических изменений на здоровье населения. С учетом климатических особенностей различных регионов определены приоритетные задачи Национального плана адаптации к изменениям климата. К ним относятся: установление пороговых значений высоких температур на основе оценки рисков здоровью, в том числе психическому здоровью; создание системы наблюдений за содержанием аллергенной пыльцы растений и распространенностью аллергических заболеваний; разработка систем профилактики для работающих на открытых пространствах и в закрытых помещениях при аномально высокой температуре (оптимальные режимы труда и отдыха); совершенствование системы эпидемиологического надзора за климатозависимыми инфекционными заболеваниями, в том числе организация микробиологического мониторинга многолетних мерзлых грунтов. Специальные планы адаптации необходимы для коренных малочисленных народов Арктики.

Ключевые слова: изменение климата, волны жары, здоровье населения, адаптация.

Изменение климата в XXI веке стало весьма существенным фактором риска здоровью населения, опередив по негативным последствиям некоторые другие воздействия окружающей среды. В шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2022) раздел о здоровье населения в меняющемся климате значительно расширен по сравнению с предыдущими докладами. После отбора публикаций по рассматриваемой проблеме список цитируемых источников к данному разделу составил 1740 статей и докладов. Проведенный экспертами МГЭИК анализ этих материалов демонстрирует увеличение числа исследований, позволяющих с высокой степенью достоверности оценить влияние изменения климата на здоровье различных групп населения в различных регионах мира, что позволило определить приоритетные направления дальнейших работ.

В России такие исследования проводятся более 20 лет. Определенным стимулом для них стала Всемирная конференция по изменению климата, проходившая в Москве в 2003 г. при поддержке ООН и других международных организаций, в том числе ВОЗ. В том же году был опубликован первый обзор зарубежной литературы по проблеме воздействия климатических изменений на здоровье населения (Ревич и др., 2022). Через год в Президиуме РАМН прошел семинар «Изменение климата и здоровье населения России в XXI веке» с публикацией сборника статей по этой проблематике (Измеров и др., 2005).

Первое приоритетное направление – защита здоровья населения от воздействия экстремальных температур

Традиционно во всех оценочных докладах ИРСС отмечается учащение волн жары на рубеже XX и XXI вв. В резюме для политиков шестого доклада этой организации подтверждается высокая степень достоверности негативного воздействия глобального потепления на здоровье населения. Среди климатических факторов волны жары представляют наибольшую опасность для здоровья с позиции популяционного риска. Например, на территории юга европейской части страны такие волны длительностью 5 дней и более наблюдаются ежегодно, начиная с 2005 г. (Бардин и др., 2023). При потеплении на 1,5 °С (по сравнению с 2 °С) прогнозируются меньшие риски заболеваемости и смертности, связанные с экстремально высокими температурами — волнами жары (очень высокая степень достоверности). Особенно неблагоприятные температурные условия останутся для островов жары в центре городов (высокая степень достоверности этой ситуации по оценкам ИРСС).

В мире стремительно растет число публикаций, посвященных последствиям воздействия температурных волн на здоровье населения, как в северных, так и в южных регионах. По прогнозам Европейского центра ВОЗ, в Европейском регионе (43 страны) в период с 2071 по 2099 г. волны жары могут привести к 47-117 тыс. случаям дополнительных смертей в год (Kendrovski et al., 2017). Вместе с тем, выполнение всеми странами региона намеченных Парижским соглашением по климату мер по снижению выбросов парниковых газов к 2030 г. во всем Европейском регионе могло бы сохранить жизни 74 тыс. человек (Защита здоровья населения..., 2017).

В фундаментальном аналитическом отчете о состоянии здоровья населения в условиях меняющегося климата приведено несколько очень важных и тревожных положений о возрастании негативных эффектов высокой температуры в 2018 г. по сравнению с предыдущими годами. Так, в этот год зафиксировано более 220 млн случаев воздействия жары на население в возрасте 65 лет и старше, что намного больше, чем за предыдущие годы. (Watts et al., 2019). В следующем докладе этой группы исследователей на основе страновых метеорологических и демографических данных был выполнен расчет избыточной смертности на-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

селения в возрасте старше 65 лет в период жарких дней. Для России выявлена избыточная смертность, составившая 18,6 тыс. случаев в год; близки к этому уровню показатели Германии – 20,2 тыс., в США – около 19,0 тыс. случаев. На наш взгляд, такие оценки достаточно реалистичны, учитывая, что воздействие только одной короткой волны жары в Москве приводит к избыточной смертности на тысячу и более случаев (Ревич и др., 2008).

В Шестом докладе ИРСС подчеркиваются высокие риски здоровью при аномально высоких температурах из-за растущей уязвимости населения (особенно в европейских странах из-за возрастания доли пожилого населения) и увеличение числа случаев экстремальной жары. Несмотря на уже хорошо изученные зависимости аномально высоких температур и обострений сердечно-сосудистых заболеваний, существуют сложные взаимодействия индивидуальной реакции.

Первые в России исследования по оценке воздействия потепления климата на показатели смертности населения по Москве и Твери были выполнены в начале 2000-х гг. и подтвердили повышенную смертность в периоды высоких температур. Более детально последствия аномальной жары на европейской части страны летом 2010 г. были изучены в Москве, Воронеже, Самаре (Ревич, 2011; Ревич и др., 2015; Куролап, 2012 и др. авторы). Особенностью ситуации жаркого лета 2010 г. в Москве было сочетанное воздействие в течение почти всех 44 дней аномально высоких температур и высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха из-за пожаров торфяников и лесных массивов, что привело к 11 тыс. случаев избыточной смертности. На других территориях европейской части России число таких случаев достигло 54 тыс. (Ревич, 2011). Примечательно, что наш прямой расчет потерь населения по сравнению с 2009 г. на основе оперативных данных Росстата почти соответствует результатам анализа избыточной смертности на основании стандартизованного коэффициента (58 тыс. случаев) (Максименко и др., 2023).

Наши дальнейшие исследования проводились по аналогичным методикам и на сопоставимых периодах исследования, составлявших в среднем 16 лет, по городам, расположенным в разных климатических зонах и на различных территориях: на севере (Мурманск, Архангельск, Якутск, Магадан), юге (Астрахань, Волгоград, Краснодар, Ростов-на-Дону), в Красноярске с резко континентальным климатом и во Владивостоке с муссонным климатом (Шапошников и др., 2018).

Для ряда городов России выявлены и обоснованы связи между числом обращений за экстренной медицинской помощью, общей смертностью и смертностью от отдельных причин (заболевания системы кровообращения, органов дыхания, пищеварения, нервной системы, травмы, утопления и самоубийства), с одной стороны, и температурой воздуха в летний период – с другой. В Москве минимум общей смертности находится в интервале температурной кривой от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и эффект «высоких» температур проявляется достаточно быстро, т. к. самая сильная зависимость смертности от температуры имеет нулевой лаг (Ревич, 2009). Порог, при котором в Москве происходит достоверный быстрый рост смертности, соответствует среднесуточной температуре $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для сравнения: температурный порог жары в Архангельске составил 17 °С для возрастной группы старше 65 лет и 17,8 °С – для группы 30–63 лет (Варакина и др., 2011), в Афинах – выше 30 °С, в Хельсинки – 23,6 °С (D'Ippoliti et al., 2010).

Более подробные описания таких ситуаций в российских городах, расположенных в различных климатических зонах, представлены в монографиях (Ревич и др., 2022; Человек в мегаполисе, 2018) и оценочных докладах Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Третий оценочный доклад, 2022). Определенное снижение избыточной смертности при волнах жары возможно при внедрении систем предупреждения о наступлении сильной жары (Sheridan et al, 2018). Этому также будет способствовать одновременное использование комплекса профилактических мер со стороны местных властей.

Стратегическая мера по защите здоровья населения от волн жары – изменение градостроительной политики, включающее уменьшение плотности застройки и плотности населения, переход к малоэтажной застройке, развитие пригородных территорий, совершенствование зеленой инфраструктуры. Заметим, что постепенное улучшение комфортности городской среды будет способствовать и уменьшению инфицированности населения респираторными заболеваниями, в том числе COVID-19. Вспышка COVID-19 выдвинула на первый план вопросы, связанные с компактностью городской застройки. Густонаселенные районы с хорошим транспортным сообщением стали горячими точками быстрого распространения пандемии из-за высокого уровня личного взаимодействия. В первых публикациях 2020 г. о вспышке заболевания в Ухане случаи COVID-19 ассоциировались с высокой плотностью населения (Peng et al, 2020; You et al, 2020), это было подтверждено в Пекине и других городах Китая (Ren et al., 2022; Lin et al., 2020). Доказательства этой связи были получены и в других странах – Канаде (You et al., 2020; Choi et al., 2021) и Италии (Carteni et al., 2020). При анализе влияния плотности населения на заболеваемость практически во всех американских штатах выяснилось, что она является самым сильным предиктором вариаций заболеваемости COVID-19 (Zhang et al., 2020).

Достаточно эффективная мера по защите здоровья населения от волн жары – развитие зеленой инфраструктуры в крупных городах. Получены научные доказательства пользы озеленения для защиты здоровья населения, как от повышенных температур, так и от высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха. Аналитический обзор по этой проблеме опубликован в 2023 г. (Ревич, 2023). Создание крупных зеленых пространств в городах – важная задача для сохранения и улучшения состояния здоровья населения в городской среде с повышенным уровнем загрязнения химическими веществами компонентов окружающей среды. По поводу важности зеленых пространств для горожан писали и выступали многие советские медики еще в 30 гг. прошлого столетия, но в наше время был создан новый инструментарий с использованием космических снимков.

С точки зрения оценки полезности зеленых пространств для здоровья городских жителей важна равномерная, а не мозаичная структура озеленения, их пе-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

шеходная доступность, которая, согласно рекомендации Европейского бюро ВОЗ, должна составлять не более 15 мин. Обеспеченность зелеными насаждениями должна составлять 9 м²/чел (Review of indicator frameworks..., 2022). Роль разных видов озеленения, в том числе вертикального («зеленые парковки», сады на крышах зданий и другие объекты), описана во многих российских публикациях, например в обзоре Вебера и Кучерова (2020), но в них не рассматривались вопросы влияния зеленых насаждений на здоровье населения с использованием методов доказательной медицины. За рубежом наблюдается резкий всплеск таких исследований примерно с 2000 г. В качестве конкретных примеров по озеленению городов приведем опыт некоторых европейских стран. В Антверпене строительство зданий регулируется строительным кодексом, который содержит специальные правила, помогающие со временем снизить тепловой стресс. Этот кодекс предусматривает покрытые травой поверхности на всех открытых частных участках и ограничение мощения в садах до одной трети площади. В Штутгарте ряд правил планирования и зонирования направлен на сохранение зеленых насаждений в плотно застроенных районах, происходит озеленение крыш, затенение фасадов зданий уличными деревьями, преобразование небольших общественных мест в «прохладные места» или установку питьевых фонтанчиков и других водных элементов, использование заброшенных земель для зеленых насаждений.

Кроме указанных стратегических задач для защиты здоровья населения в ближайшее время необходимо развитие систем предупреждения о наступлении сильной жары. К 2025 г. Европейский центр среднесуточных прогнозов погоды планирует подготовить оперативную модель с шагом сетки 2 км. Такая сеть позволит получить прогнозы погоды в мегаполисах по десяткам и сотням территориальных единиц, например в Москве в пределах Московской кольцевой дороги по 220 точкам (Вильфанд и др., 2018). Для адекватной защиты здоровья населения от воздействия температурных волн важны знания о порогах температуры воздуха, при превышении которых необходим комплекс профилактических мероприятий. Обоснование пороговых значений температуры с позиции риска здоровью представляет собой шаг вперед по сравнению с чисто «синоптическим» подходом, содержащимся в материалах Росгидромета по определению жары как экстремального явления. Температурные пороги определяются с помощью численного критерия риска здоровью на основе эколого-эпидемиологических исследований и использования процентилей многолетнего распределения среднесуточных температур в летний и зимний сезоны. Результаты исследований показывают, что в летний период для защиты населения оправдан выбор порога на уровне 97-98-го перцентиля (Шапошников и др., 2018). За последние 25 лет по сравнению с предыдущим периодом существенно возросли как средние летние температуры, так и значения указанных процентилей. В будущем при увеличении количества дней с аномально высокой температурой число случаев смертельных исходов может увеличиваться.

При аномальной жаре летом 2010 г. произошел значительный рост смертности, поэтому впоследствии мэром Москвы был утвержден План действий орга-

нов исполнительной власти города по снижению воздействия жары и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения (Ревич и др., 2015). Приведенные в таблице градации опасности основаны на реальных величинах экспозиции и соответствующих им процентилям многолетних распределений среднесуточных значений каждого фактора.

План действий в Москве, утвержденный в 2014 г., включал следующие мероприятия:

- систему раннего оповещения о вероятности возникновения аномальной жары, а также других экстремальных метеорологических явлений и повышенном загрязнении атмосферного воздуха;
- порядок объявления и действия при возникновении подобных ситуаций;
- план информирования населения об аномальной жаре и загрязнении атмосферного воздуха;
- план ежегодных и оперативных мероприятий по снижению воздействия рассматриваемых факторов на здоровье населения;
- порядок надзора и оценки эффективности реализации плана действий.

Таблица. Величины экспозиции г. Москвы, соответствующие им процентилям и среднее число дней в году, когда ожидается данный уровень опасности (Ревич и др., 2015)

Показатель	Уровень опасности			
	1 низкий	2 настораживающий	3 средний	4 высокий
Температура				
Экспозиция, °С*	< 21	21–22	22–23	> 23
Процентиль	< 94,0	94,0–95,8	95,8–96,4	> 96,4
Число дней	343,1	6,6	2,2	13,1
Среднесуточная концентрация РМ₁₀				
Экспозиция, мкг/м ³	< 53	53–96	96–138	> 138
Процентиль	< 84,4	84,4–98,6	98,6–99,6	> 99,6
Число дней	308,1	51,8	3,7	1,5
Озон				
Экспозиция, мкг/м ³	< 53	53–102	102–151	> 151
Процентиль	< 95,7	95,7–100	н.д.	н.д.
Число дней	349,3	15,7	н.д.	н.д.

В качестве исполнителей плана мер по снижению воздействия аномальной жары и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения в Москве выступают департаменты природопользования и охраны окружающей среды Мо-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

сквы, здравоохранения, социальной защиты населения, образования, другие городские департаменты и управления; префектуры и управы районов. На основе этого плана Департамент здравоохранения разработал более детальный план действий, который был реализован во время волны жары 2015 г.: улучшилась материальная база стационаров, они были дополнительно оснащены кондиционерами.

Информационные материалы о поведении населения во время жары должны распространяться с привлечением скорой медицинской помощи, больниц, психоневрологических диспансеров, аптек, центров социального обеспечения, домов престарелых и инвалидов. При этом особо пристальное внимание необходимо уделять жителям центра города. Действенная мера защиты здоровья работающих во время жары – изменение графика работ с перерывом в часы наибольших температур – широко используется в южных странах, и Роспотребнадзор летом 2021 г. разместил на сайте рекомендации предпринимателям о сокращении рабочего времени, а также о поведении в периоды жары.

В мегаполисах с их широкими финансовыми возможностями наиболее реально осуществление мер адаптации к изменениям климата всего городского хозяйства, в том числе его социального блока. Такие меры требуют эффективных действий городских властей, поддерживаемых грамотным управлением на разных уровнях. В этой связи важна классификация российских мегаполисов по параметру «относительной характерности волн жары» с расчетом отношения между средней за весь теплый период максимальной суточной температурой и средним суточным максимумом во время волн жары (Константинов и др., 2018).

В России миллионы людей проживают в мегаполисах и других крупных городах и подвергаются воздействию волн жары, однако разработаны пока только два плана действий по адаптации, направленные на защите здоровья населения: в Архангельской области в рамках проекта Европейского бюро ВОЗ (Стратегия адаптации к воздействию изменения климата..., 2012) и в Москве. После жары 2010 г. специалисты Национального медицинского центра кардиологии МЗ РФ на основании серии клинико-эпидемиологических исследований разработали систему комплексной профилактики осложнений сердечно-сосудистых заболеваний (Агеев и др., 2012; Смирнова и др., 2016), даже короткие волны жары (3-5 дней), без которых практически не обходится ни одно московское лето, приводят к увеличению числа осложнений у больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями в 4,5 раза (Смирнова и др., 2013).

В индустриально развитых городах негативный эффект здоровью от волн жары сочетается с воздействием повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха. С позиции оценки рисков внешних факторов здоровью именно этот фактор является ведущим. Согласно глобальным оценкам рисков избыточной смертности населения от различных факторов, загрязнение атмосферного воздуха занимает четвертое место после высокого артериального давления, курения и недостаточного питания. Присутствие в воздухе мелкодисперс-

ных взвешенных частиц и других загрязняющих веществ приводит к 6,67 млн случаев смерти в год от ишемической болезни сердца, инсульта, хронической обструктивной болезни легких и рака легких (Health Effects Institute, 2020). Ухудшение качества атмосферного воздуха в населенных пунктах нашей страны происходит не только от воздействия техногенных выбросов, но и от возрастающего числа массивных пожаров. К сожалению, из-за отсутствия первичных данных о среднесуточных концентрациях загрязняющих веществ во время пожаров невозможно рассчитать риски, которые они наносят здоровью населения. Единственное исследование, содержащее такие сведения, касается ситуации в Москве жарким летом 2010 г.

Во многих российских городах (Красноярске, Норильске, Новокузнецке, Кемерово и др.) с развитой металлургической, химической, угольной и другими видами промышленности и энергетики возможен двойной – химический и термический – удар по здоровью населения. Кроме того, все большие риски для здоровья возникают из-за пожаров лесных массивов, в результате чего происходит выброс в атмосферу взвешенных частиц, в том числе черного углерода. Число таких пожаров значительно увеличилось на территории выше 60-й параллели северной широты (Маслобоев и др., 2022). Масштабность пожаров в Якутии в 2022 г. стала причиной объявления чрезвычайной ситуации на некоторых территориях этой республики, сообщалось о повышенном уровне загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами, а их выпадение на белый снежный покров приводит к уменьшению альбедо и соответствующему ускорению таяния мерзлоты.

Второе приоритетное направление

Второе приоритетное направление, требующее усиления профилактической работы в условиях потепления климата, – эпидемические риски от климатозависимых инфекционных заболеваний. В России выполнен ряд доказывающих значимость температурного фактора эпидемиологических исследований климатозависимых инфекционных заболеваний, в том числе клещевым энцефалитом и геморрагическими лихорадками. Потепление климата оказывает влияние на частоту природно-очаговых заболеваний, изменяя условия существования популяций переносчиков и условия развития возбудителей в переносчиках. Эти факторы влекут за собой изменение возможностей передачи многих болезней человека и животных, распространяющихся при посредстве членистоногих переносчиков, прежде всего двукрылых. Наиболее существенные изменения климатического ареала ожидаются для клеща *Ixodes ricinus* в 2030–2039 гг. по сравнению с 1990–1999 гг. на юге Карелии, в Архангельской области и Республике Коми (Крыленко и др., 2023). Детально изучено воздействие климатических факторов на распространенность лихорадки Западного Нила на юге России и клещевого энцефалита на севере, а также доказано продвижение Крымской геморрагической лихорадки в северном направлении (Бутенко, 2004).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Основные меры адаптации влияния изменений климата на климатозависимые инфекционные заболевания (Малеев, 2019) должны быть направлены на:

- подготовку системы здравоохранения к риску изменения географического распространения инфекционных заболеваний, появления новых, не типичных для региона, активации «забытых» (в частности, сибирской язвы) инфекционных заболеваний, оптимальный путь решения данной задачи – развертывание экстренных инфекционных отделений определенного профиля;

- увеличение числа специально подготовленного медицинских работников (как в специализированных клиниках, так и в многопрофильных лечебно-профилактических учреждениях (ЛПУ));

- рост пропускной способности ЛПУ для эффективной помощи населению, потребность в которой возрастает в летние месяцы в связи с заболеваниями сердечно-сосудистой и дыхательной систем, а также климатозависимыми инфекционными заболеваниями и при волнах холода с обморожениями, переохлаждением, острыми респираторными заболеваниями;

- изменение в период аномальных колебаний температуры (без ущерба для населения) графика работы ЛПУ, временный отказ от плановых операций, обследований и т. д.;

- оптимизацию межведомственного взаимодействия,

- разработку комплексных планов адаптации.

Четвертое приоритетное направление

Четвертое приоритетное направление – влияние экстремально высоких температур на психическое здоровье. Во время жары на фоне повышенного потоотделения при неадекватном восполнении водного баланса возникают обезвоживание и нарушение микроциркуляции, происходит гемоконцентрация, провоцирующая тромбообразование с развитием инсультов. Это подтверждают данные о структуре смертности населения во время волн жары (Чазов и др., 2012). Вероятно, дегидратация также может усилить дисциркуляторную энцефалопатию, что приводит к определенным изменениям психического здоровья.

Пути воздействия климатических явлений на психическое здоровье разнообразны, сложны и взаимосвязаны с другими неклиматическими факторами, создающими уязвимость человека. Аномально высокие температуры могут привести к целому ряду возможных последствий для психического здоровья, включая тревогу, депрессию, самоубийство, злоупотребление психоактивными веществами и проблемы со сном. Обзор исследований с использованием различных методов по 19 странам (Thompson et al., 2018) выявил достоверный повышенный риск самоубийства при высоких температурах, такие же результаты были получены и в Москве при анализе воздействия короткой волны жары в 2006 г. (Ревич и др., 2008). Летний рост алкогольных психозов коррелировал с ростом температуры, влажности воздуха и со снижением парциального давления атмосферного кислорода, однако объяснения этому явлению пока нет (Немцов и др., 2013).

Изменения климата и экологической ситуации особенно негативно могут повлиять на психическое здоровье малочисленных коренных народов, чья культура и благополучие обычно тесно связаны с местной окружающей средой. Существует связь этих факторов с ростом случаев депрессии, самоубийств среди народа саами в Финляндии (Jaakkola et al., 2018). Возможно, что такие расстройства присутствуют и у коренных малочисленных народов российского Севера.

Пятое направление

Пятое направление – исследования по воздействию аномально высоких температур на здоровье людей, работающих в условиях жаркого микроклимата в закрытых помещениях и на открытых пространствах. Профессиональная тепловая нагрузка у них проявляется обезвоживанием, снижением функции почек, утомляемостью, головокружением, спутанностью сознания, потерей концентрации внимания. В РФ научные исследования по этому направлению в последние годы не проводятся, но в 2021 г. Роспотребнадзор опубликовал краткие рекомендации для работающих в условиях повышенных температур воздуха по сокращению рабочего времени или перенесению работ во время жары на утреннее или вечернее время, питьевому режиму и особенностям питания. Для работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях следует использовать Методические рекомендации по режимам труда и отдыха Роспотребнадзора (МР 2.2.7.2129-06. 2.2.7.).

Значительное место в Шестом докладе ИРСС уделяется проблемам здоровья коренных малочисленных народов. В нашей стране это особенно актуально для Арктического макрорегиона, где более высокие температуры с увеличением числа циклов замерзания-оттаивания в зимний период означают увеличение числа транспортных происшествий среди коренных народов из-за более слабого льда на путях движения стад оленей, а также изменения снежного покрова. Затрудненный доступ к медицинскому обслуживанию в экстремальных погодных условиях представляет собой основной риск для здоровья коренных народов, проживающих в отдаленных районах НАО (Шартова и др., 2019).

Климатические риски для здоровья неравномерно распределены по территории страны: наиболее уязвимы Арктический макрорегион и аридные территории. Сопряженный анализ ежесуточных температур и смертности от основных климатозависимых причин позволил определить риски от воздействия аномально высоких и низких температур за 1999–2016 гг. для Мурманска, Архангельска, Якутска и Магадана. При воздействии коротких волн жары относительный риск смертности оказался выше, чем при длительных периодах жаркой погоды. Возможное объяснение состоит в том, что во время длительных волн жары избыточная смертность компенсируется «эффектом жатвы» – краткосрочным снижением смертности в начале волны.

Потепление климата в Арктическом макрорегионе привело к разрушению многолетней мерзлоты – с этим связаны многие риски для здоровья как коренного, так и пришлого населения. Так, анализ данных о числе сибиреязвенных

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

скотомогильников, тенденциях повышения среднелетних температур и плотности населения позволил разработать коэффициенты относительной опасности вероятности вспышек сибирской язвы на территориях 70 районов Арктического макрорегиона. Наибольший популяционный риск характерен для городских округов, поскольку в них плотность населения гораздо выше, чем на других территориях. Результаты этого исследования могут помочь в расстановке приоритетов при разработке профилактических мероприятий в эндемичных по сибирской язве арктических и субарктических территориях (Ревич, 2021).

Значительное место в Шестом докладе ИРСС занимает прогноз последствий потепления климата в целом для всего населения Земли и отдельных регионов. В России подобные сопряженные исследования ежесуточных показателей температуры и смертности от основных причин выполнены совместно с ГГО им. Воейкова по трем городам: Мурманску, Архангельску и Якутску. Суточные температурные аномалии, ожидаемые к середине и концу XXI века, были определены по ансамблевым расчетам региональной климатической модели. При ожидаемом потеплении климата к 2090–2099 гг. произойдет достоверное снижение «зимней смертности» от всех причин на 3,1–4,5% (Шапошников и др., 2019).

Эта же сценарная модель использовалась при оценке влияния изменений климата на уровень заболеваемости и смертности населения от сердечно-сосудистых заболеваний в Ленинградской области. Анализ метеоданных позволил выполнить кластерный анализ по районам и показать усиление волн жары к концу этого века и повышение уровня смертности от этих болезней (Клюева и др., 2021).

Потепление климата на Севере также несет реальную угрозу температурному режиму ледников, возможность инфицирования продуктов питания и возникновения кишечных инфекций. Например, на Чукотке температура ледника повысилась, и в нем были обнаружены бактерии-возбудители иерсиниозов, представляющих опасность загрязнения продуктов питания коренных народов (Неустроев и др., 2019; Комова и др., 2020).

Результаты приведенных исследований могут быть использованы при разработке конкретных рекомендаций по планированию мер адаптации с целью предотвращения избыточной смертности, заболеваемости и других изменений здоровья и работоспособности, связанных с воздействием аномально высоких и низких температур. Это особенно актуально для наиболее уязвимых групп населения с учетом временных лагов между воздействием аномальных температур и последствиями для здоровья, а также для разработки моделей прогнозов распространения климатозависимых инфекционных заболеваний.

Литература

1. Агеев Ф.Т., Смирнова М.Д., Галанинский П.В. Оценка непосредственного и отсроченного воздействия аномально жаркого лета 2010 г. на течение сердечно-сосудистых заболеваний в амбулаторной практике // Терапевтический архив. 2012. № 8. С.45-51.

2. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Попов И.О. Крупномасштабные летние волны тепла на юге Европейской России. // *Метеорология и Гидрология*, 2023, № 1, С. 5-17.

3. Бутенко А.М., Ларичев В.Ф. Влияние климата на активность и распространение очагов крымской геморрагической лихорадки (КГЛ) в северной части ареала вируса КГЛ / в кн.: *Изменение климата и здоровье России в XXI веке / Сб. материалов междунар. семинара.* – М.: АдамантЪ, 2004, С. 134–138.

4. Варакина Ж.Л., Юрасова Е.Д., Ревич Б.А. и др. Влияние температуры воздуха на смертность населения Архангельска в 1999–2008 гг. // *Экология человека*, 2011, № 6, С. 28–36.

5. Вебер А.А., Кучеров А.С., Лылов А.С. Озеленение городов в условиях плотной застройки // *Мир инноваций*. 2020. № 4. С. 8-18. DOI: 10.24855/biosfera.v14i1.661.

6. Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Ривин Г.С. На пути к прогнозу погоды для мегаполисов. Сборник тезисов докладов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика А. М. Обухова. «Турбулентность, Динамика атмосферы и климата». — Долгопрудный: «Физматкнига», 2018.

7. Защита здоровья населения Европейского региона от изменений климата: обновления на 2017 г. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ; 2017 (на англ. яз.). http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/355792/Protecting_Health_Europe_From_Climate_Change.pdf (дата обращения 02.02.2021).

8. Измеров Н.Ф., Ревич Б.А., Коренберг Э.И. Изменения климата и здоровье населения России в XXI веке. // *Медицина труда и промышленная экология*, 2005, № 4, С. 1-6.

9. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020. – 324 с.

10. Ключева М.В., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л., Павлова Т.В., Ефимов С.В., Катцов В.М. Влияние климата на сердечно-сосудистые болезни и связанную с ними смертность в Ленинградской области по данным наблюдений и сценарным прогнозам на середину и конец XXI века // *Метеорология и гидрология*, 2021, № 5, С. 89-113.

11. Комова Н.Н., Маслаков А.А. Мониторинг теплового состояния подземных хранилищ Восточной Чукотки. Вторая российская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны». 22-27 ноября 2020 г. – М.: Институт глобального климата и экологии, 2020, С. 236–239.

12. Константинов П.И., Шартова Н.В. Оценка термического комфорта во время волн жары в крупнейших городах России. Человек в мегаполисе. Опыт междисциплинарного исследования / под ред. Б.А. Ревича и О.В. Кузнецовой. — М.: ЛЕНАНД, 2018. – С. 328-339.

13. Крыленко С.В., Добролюбов Н.Ю., А.Ю. Богданович А.Ю., Липка Л.Н. Вероятностная оценка изменения климатического ареала *Ixodes ricinus* Linnaeus,

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

1758 – переносчика опасных заболеваний человека. Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». Сб. тезисов докладов. – Физматкнига, 2023. – С. 152

14. Куролап С.А. Региональные особенности и прогнозные оценки влияния климатических изменений на здоровье населения Центрального Черноземья. Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы): Материалы международной научной конф. – Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2012. – С.403-409

15. Липка О.Н., Данилов А.Ф., Совкина В.В., Суляндзига Р.В., Вронский Н.В. Планирование адаптации к изменениям климата для коренных народов на примере села Ловозеро (Мурманская область). Вторая российская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны». 22-27 ноября 2020 г. – М.: Институт глобального климата и экологии, 2020. – С. 205- 210.

16. Максименко М.Р., Тимонин С.А., Шартова Н.В. Пространственные особенности избыточной смертности во время жары 2010 г. в Европейской России. Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». Сб. тезисов докладов. — Физматкнига, 2023. – С. 153.

17. Малеев В.В. Климатозависимые инфекционные болезни человека // В кн.: Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы / под ред. Б.А. Ревича, А.О. Кокорина. – М.: ИНП РАН, 2019. – С. 110–140.

18. Маслобоев В.А., Ключникова Е.М. Влияние микрочастиц черного углерода на здоровье населения и климат арктических регионов // Арктика 2023: актуальные вопросы, проблемы, решения, 2022, № 2 (10), С. 32- 45.

19. Немцов А.В., Ревич Б.А., Савельев Д.В., Клепиков П.Н. Алкогольные психозы и погодные условия в Москве в 2005–2011 гг. // Вопросы наркологии, 2013, № 2, с. 16–26.

20. Неустроев М.П., Тарабукина Н.П., Максимова А.Н., Степанов К.М., Степанова А.М. Микробиота и санация подземных ледников при хранении продуктов питания. – Якутский медицинский журнал, 2019, № 1 (65), С. 79-82.

21. Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска: Методические рекомендации МР 2.1.10.0057-12. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. – 48 с.

22. Ревич Б.А. Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека, 2011, № 7, С. 3–9.

23. Ревич Б.А. Волны жары в мегаполисах и пороги их воздействия на смертность населения // Гигиена и санитария. 2017. Том 96. № 11. С. 1073-1078.

24. Ревич Б.А. Значение зеленых пространств для защиты здоровья населения городов // Анализ риска здоровья. 2023. № 2. С. 168-185. DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.17.

25. Ревич Б.А. О необходимости защиты здоровья населения от климатических изменений // Гигиена и санитария, 2009, № 5, С. 60–64.

26. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Раичич С.Р., Сабурова С.А., Симонова С.А. Зонирование административных районов Российской Арктики по степени опасности разрушения скотомогильников в результате деградации многолетней мерзлоты // Анализ риска здоровью, 2021, № 1, С. 115–125. DOI: 10.21668/health.risk/2021.1.12

27. Ревич Б.А., Малеев В.В. Изменения климата и здоровье населения России: Анализ ситуации и прогнозные оценки. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 210 с.

28. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Высокие температуры воздуха в городах – реальная угроза здоровью населения. в кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. – М.: Издательское товарищество «АдамантЪ», 2004. – С. 175-184.

29. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Авалиани С.Л., и др. Опасность для здоровья населения Москвы высокой температуры и загрязнения атмосферного воздуха во время аномальных погодных явлений // Гигиена и санитария. 2015. № 1. С.36-40.

30. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Волны жары и холода в городах, расположенных в Арктической и субарктической зонах как факторов риска повышения смертности населения на примере Архангельска, Мурманска и Якутска // Гигиена и санитария, 2018, №9, С. 791-799. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798.

31. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Першаген Г. Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // Профилактическая медицина, 2015, №5, С. 15-19.

32. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Семутникова Е.Г. Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы в 2000–2006 гг. // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 7. С. 29–35.

33. Росгидромет. РД 52.88699–2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения опасных природных процессов.

34. Смирнова М.Д., Агеев Ф.Т., Свирида О.Н., Коновалова Г.Г., Тихазе А.К., Ланкин В.З. Влияние летней жары на состояние здоровья пациентов с умеренным и высоким риском сердечно-сосудистых осложнений // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2013. № 12(4). С. 56-61. doi:10.15829/1728–8800-2013-4-56-61.

35. Смирнова М.Д., Фофанова Т.В., Яровая Е.Б., Агеев Ф.Т. Прогностические факторы развития сердечно–сосудистых осложнений во время аномальной жары 2010 г. (когортное наблюдательное исследование). // Кардиологический вестник. 2016. № 1(9). С. 43-51. <https://readera.ru/14334763> (дата обращения 29.04.2019).

36. Стратегия адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и Ненецкого автономного округа Российской

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Федерации. Министерство здравоохранения и социального развития Архангельской области, ГБОУ ВПО «Северный государственный медицинский университет». Архангельск, 2012.

37. Третий Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург. Научные технологии, 2022. – 600 с.

38. Чазов Е.И., Бойцов А.И. Влияние аномального повышения температуры воздуха на смертность населения // Терапевтический архив, 2012, № 1, С. 29–36

39. Человек в мегаполисе: опыт междисциплинарного исследования. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 640 с.

40. Шапошников Д.А., Ревич Б.А. Температурные волны жары/холода и избыточная смертность населения в 4-х городах Арктического макрорегиона // Экология человека, 2023, № 4, С. 287-300.

41. Шапошников Д.А., Ревич Б.А. О некоторых подходах к вычислению рисков температурных волн для здоровья // Анализ риска здоровью, 2018, № 1, С. 22–31.

42. Шапошников Д.А., Ревич Б.А., Школьник И.М. Сценарные оценки потепления климата и смертности населения российских приарктических городов в XXI веке // Анализ риска здоровью. 2019. № 4. С.37-49.

43. Шартова Н.В., Грищенко М.Ю., Ревич Б.А. 2019. Оценка территориальной доступности медицинских учреждений по открытым данным на примере Архангельской области. Социальные аспекты здоровья населения. Vestnik.mednet.ru/content/view/1114/27/lang.ru

44. Carteni, A., Fransesco, L., Martino, M., How mobility habits influenced the spread of the COVID-19 pandemic: Results from the Italian case study // Sci.Total Envir. 2020. Nov 1:741:140489/ DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140489

45. Choi, K.H., Denice, P., Haan, M., Zajacova, A. Studying the social determinants of COVID-19 in a data vacuum. // Can. Rev. Sociol. 2021; 58: 146–164. <https://doi.org/10.1111/cars.12336>

46. Health Effects Institute. 2020. State of Global Air 2020.Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. <https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/documents/2020-10/soga-2020-report.pdf>

47. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. // Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

48. Jaakkola J.J.K., Juntunen S. and Nakkalajarvi K. The holistic effects of climate change on the culture, well-being, and health of the Saami, the only indigenous people in the European Union. – Curr. Environ. Health Rep., 2018, vol. 5(4), pp. 401-417, doi:10.1007/s40572-018-0211-2.

49. Kendrovski V., Baccini M., Martinez G.S., Wolf T., Paunovic E., Menne B. Quantifying projected heat mortality impacts under 21st-century warming conditions for selected European countries // *Int J Environ Res Public Health*. 2017. Vol. 14(7). P. E729. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070729>.
50. Lin, C., Lau, A.K.H., Fung, J.C.H., Guo, C., Chan, J.W.M., Yeung, D.W., Zhang, Y., Bo, Y., Hossain, M.S., Zeng, Y., Lao, X.Q., 2020. A mechanism-based parameterisation scheme to investigate the association between transmission rate of COVID-19 and meteorological factors on plains in China. // *Sci. Total Environ*. 737.
51. Peng, Z., Wang, R., Liu, L., & Wu, H. (2020). Exploring urban spatial features of COVID-19 transmission in Wuhan based on social media data // *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ijgi9060402>, 402–402.
52. Ren, J., Yang, J., Wu, F., Sun, W., Xiao, X., & Xia, J. (2022). Regional thermal environment changes: Integration of satellite data and land use/land cover. // *iScience.*, Article 105820. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105820>
53. Review of indicator frameworks supporting urban planning for resilience and health: third report on protecting environment and health by building urban resilience. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2022. 61 p. http://www.who.int/hia/green_economy/indicators_cities.pdf (accessed 30.12.2022).
54. Sheridan, S., Allen, M. Temporal trends in human vulnerability to excessive heat // *Environ. Res. Lett.*, 2018, vol. 13, doi:10.1088/1748-9326/aab214.
55. Thompson, R., R. Hornigold, L. Page and T. Waite, Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: a systematic review // *Public Health*, 2018, vol. 161, pp. 171-191, doi:10.1016/j. puhe.2018.06.008.
56. Watts, N., Amann, M., Arnell, N., et al. The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate // *Lancet*. 2019. Vol. 394(10211). P. 1836–1878. doi:10.1016/S0140-6736(19)32596-6
57. You, H., Wu, X., & Guo, X. (2020). Distribution of COVID-19 morbidity rate in association with social and economic factors in Wuhan, China: Implications for urban development // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph17103417>. Scopus.
58. Zhang, C.H., Schwartz, G.G. Spatial disparities in coronavirus incidence and mortality in the United States: An ecological analysis as of May 2020. *J. Rural Heal.* 2020; 36: 433–445. <https://doi.org/10.1111/jrh.12476>

ПОТЕНЦИАЛ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ В АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В РОССИИ

О.Н. Липка^{1,2*}, А.П. Андреева¹

¹ Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля,
Москва

² Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Москва

**olipka@mail.ru*

Аннотация. Россия обладает гигантским потенциалом экосистемных услуг для адаптации к изменениям климата. Объем предоставляемых услуг и их эффективность различаются в зависимости от природных зон, опасных климатообусловленных явлений и объектов адаптации. Наибольшим потенциалом экосистемных услуг обладают особо охраняемые природные территории (244,3 млн га) и защитные леса (284,6 млн га). Оценки стоимости защитных экосистемных услуг минимум в 6-8 раз превышают стоимость добываемых ресурсов. Накопленный опыт позволил начать проект по созданию защитной лесной полосы, протяженностью 8000 км от Ростовской области до Бурятии. Впервые экосистемные услуги были включены в план адаптации Москвы. Необходимо эффективно использовать имеющийся потенциал для адаптации регионов России.

Ключевые слова: изменения климата, экосистемные услуги, адаптация на основе экосистем

Введение

Роль экосистемных услуг в адаптации к изменениям климата и целесообразность применения решений, основанных на природе, признана в международном научном сообществе (IPBES, 2019; IPCC, 2022). Организацией ООН по окружающей среде (UNEP) разработаны «Руководящие принципы интеграции экосистемной адаптации в национальные планы адаптации» (UNEP, 2021).

В России методы адаптации на основе экосистем в настоящее время недооценены, что имеет ряд объективных причин:

- незавершенность общей оценки экосистемных услуг для территории страны (Экосистемные услуги..., 2016);
- применение традиционной системы ТЕЕВ (The Economics of Ecosystem and Biodiversity, 2010) для классификации и оценки экосистемных услуг, в которой

важные с точки зрения адаптации регулирующие экосистемные услуги не выделены;

- больше внимания уделяется экосистемным услугам по поглощению и сохранению запасов углерода;

- в методических и нормативных документах указывается на необходимость адаптации экосистем, а возможность их использования для адаптации других объектов не упоминается (Климатическая доктрина..., 2023);

- хотя подходы к стоимостной оценке экосистемных услуг разрабатываются достаточно давно (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Бобылев, Захаров, 2009), единая методика не разработана, результаты различаются на порядки в зависимости от применяемых подходов и спектра учтенных экосистемных услуг (Экосистемные услуги..., 2016).

Целью данной статьи является оценка потенциала использования направлений адаптации на основе экосистем, актуальных для природных условий России.

Материалы и методы

Экосистемные услуги – выгоды, которые человечество получает от экосистем, т.е. услуги экосистем по обеспечению человечества природными ресурсами, здоровой средой обитания, иными экологически и экономически значимыми «продуктами» (Экосистемные услуги, 2016).

Выделяют:

- снабжающие/производящие (пища, вода, лес, сырье);
- регулирующие/средообразующие (воздействие на климат, контроль над наводнениями, стихийными бедствиями, качество водных ресурсов и пр.);
- культурные (рекреационные ресурсы, эстетические и духовные ценности);
- поддерживающие (почвообразование, фотосинтез, круговорот азота и пр.) (Экосистемные услуги, 2016).

В качестве синонима экосистемных услуг рассматривают *решения, основанные на природе* (Nature-based solutions) – использование природных объектов и процессов для решения социально-экологических проблем, таких, как: изменение климата, водная безопасность, загрязнение воды, продовольственная безопасность, здоровье человека, утрата биоразнообразия и управление рисками стихийных бедствий (Cohen-Shacham et al., 2016; IUCN, 2020). В Указе Президента Российской Федерации (2024) использован перевод «природоподобные технологии». В числе приоритетных направлений научно-технологического развития включен «переход к развитию природоподобных технологий, воспроизводящих системы и процессы живой природы в виде технических систем и технологических процессов, интегрированных в природную среду и естественный природный ресурсооборот» (Указ Президента..., 2024).

Межправительственная группа экспертов по биоразнообразию и экосистемным услугам предложила новый термин: *вклад природы в жизнь человека*

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

(Nature's contributions to people, NCP) – вклад, как положительный, так и отрицательный, живой природы (т. е. разнообразия организмов, экосистем и связанных с ними экологических и эволюционных процессов) в качество жизни людей. Полезный вклад природы включает в себя обеспечение продовольствием, очистку воды, борьбу с наводнениями и художественное вдохновение, тогда как вредный вклад включает в себя передачу болезней и хищничество, которые наносят ущерб людям или их имуществу (IPBES, 2019).

Определение *адаптации к изменениям климата* наиболее известно в трактовке IPCC (2001): «приспособление природных и антропогенных систем в ответ на фактическое или ожидаемое воздействие изменений климата или его последствий, которое позволяет снизить вред и использовать благоприятные возможности». В более поздних публикациях IPCC термин уточняется и рассматривается как «процесс приспособления к фактическому или ожидаемому климату и его последствиям. В человеческих системах адаптация направлена на смягчение или предотвращение ущерба, или использование полезных возможностей. В некоторых природных системах вмешательство человека может способствовать адаптации к ожидаемому климату и его последствиям» (IPCC, 2014).

Адаптация на основе экосистем (адаптация с позиций экосистем, Ecosystem-based adaptation – EbA) – «использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг в рамках общей стратегии адаптации, чтобы способствовать улучшению благосостояния общества, в том числе коренных народов и местных общин, и чтобы помочь людям адаптироваться к неблагоприятным последствиям изменения климата» (КБР, 2018а). Естественные экосистемы могут быть трансформированы или заменены на искусственно-поддерживаемые, в том числе с доминированием чужеродных видов. Главный критерий – получение максимального эффекта с точки зрения адаптации к изменениям климата за счет использования экосистемных услуг. Рассматривается как одно из направлений основанных на природе решений.

Ecosystem-based adaptation часто переводится как «экосистемный подход к адаптации», что предполагает деятельность на основе экосистемного подхода. В соответствии с определением Конвенции о биологическом разнообразии: «*экосистемный подход* – стратегии комплексного управления земельными, водными и живыми ресурсами, которая обеспечивает их сохранение и устойчивое использование на справедливой основе» (КБР, 2000). Если в экосистемном подходе ведущую роль играет природоохранная направленность – сохранение экосистем и их компонентов при любом виде землепользования, то в адаптации на основе экосистем – польза для общества.

РКИК ООН (2013) подчеркивает принципиальное различие между адаптацией экосистем и адаптацией на основе экосистем: «Определяя основанные на экосистемах подходы к адаптации, участники отметили необходимость перейти от чисто антропогенной концепции к концепции, которая охватывала бы как экосистемы, так и людей. Между основанными на экосистемах подходами к адап-

тации и адаптацией экосистем необходимо проводить концептуальное различие, признавая более широкую роль, которую экосистемы могут играть в действиях по борьбе с изменением климата» (РКИК ООН, 2013).

С точки зрения Конвенции о биологическом разнообразии, адаптация на основе экосистем должна включать следующие характеристики (КБР, 2018б):

а) повышение устойчивости и способности адаптироваться, а также уменьшение уязвимости в социальной и экологической областях перед рисками, связанными с последствиями изменения климата, обеспечивая постепенную и трансформационную адаптацию и уменьшение опасности бедствий;

б) создание общественных благ, способствующих устойчивому и надежному развитию с использованием справедливых, прозрачных и основанных на широком участии подходов;

в) использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг путем устойчивого управления, сохранения и восстановления экосистем;

г) они должны быть частью общих стратегий адаптации и уменьшения опасностей, которые поддерживаются политическими мерами на нескольких уровнях, и поощрять справедливое управление при одновременном повышении потенциала» (КБР, 2018б).

Для целей адаптации к изменениям климата наиболее применимы следующие средообразующие экосистемные услуги, из перечисленных в (Экосистемные услуги..., 2016):

- услуги по регулированию климата и атмосферы включают снижение силы ветра, ущерба от ураганов и штормов растительностью; регуляцию потоков влаги между поверхностью и атмосферой (формирование облаков, влияние на количество осадков);

- услуги по регулированию количества и качества пресной воды: а) водоохранные (водосберегающие) услуги, т. е. регуляция объема стока воды; б) водорегулирующие услуги, интенсивности наводнений, паводков и причиняемого ими ущерба, с одной стороны, и увеличение меженного стока, с другой; в) обеспечение качества воды наземными экосистемами, т. е. очистка стока от загрязнений; г) самоочищение воды в водных экосистемах, включая ее разбавление и обезвреживание загрязнителей;

- услуги по формированию плодородных почв и защите почв от эрозии (предотвращение потери сельскохозяйственных и иных экономически важных угодий, снижения плодородия почв, сокращения их буферной функции по отношению к загрязнению, увеличения стока наносов в водоемы, их загрязнения и заиления, частоты пыльных бурь, оползней и селей и др.;

- услуги по регуляции криогенных процессов (в основном за счет теплоизоляции мерзлых пород в летнее время) (Экосистемные услуги..., 2016).

Список нуждается в уточнении и дополнении. Например, в него должна быть включена экосистемная услуга по уменьшению негативного эффекта волн жары лесными массивами распространяется на значительные прилегающие территории (Ольчев и др., 2017).

Результаты и обсуждение

Экосистемные услуги, сохранение биоразнообразия и землепользование. Использование экосистемных услуг ограничено с нормативно-правовой точки зрения системой землепользования. Категория земель по их назначению определяет тип естественных или антропогенно-модифицированных экосистем, которые могут поддерживаться на данном участке.

Конвенция о биологическом разнообразии в качестве первоочередной меры по адаптации экосистем к изменениям климата выделяет снятие антропогенной нагрузки с экосистем (КБР, 2018а). Максимальная эффективность экосистемных услуг достигается в естественных ненарушенных (малонарушенных) ландшафтах. В данном контексте особо охраняемые природные территории (ООПТ) могут рассматриваться как каркас стабилизации и экологической устойчивости гораздо большей территории.

Меры адаптации на основе экосистем всегда направлены на адаптацию к изменениям климата антропогенных объектов. Они могут одновременно способствовать сохранению биологического разнообразия, если это не противоречит задаче адаптации основного антропогенного объекта. Более того, в качестве мер адаптации на основе экосистем может предлагаться создание ООПТ, например, для стабилизации гидрологического режима рек, обеспечивая при этом защиту нерестилищ ценных видов рыб (рис. 1).



Рис. 1. Соотношение адаптации, сохранения биоразнообразия и землепользования

Потенциал экосистемных услуг горных и равнинных биомов. Набор и объем предоставляемых экосистемных услуг существенно различаются по природным зонам. Значительная протяженность территории страны с севера на юг соответствует спектру сменяющих друг друга экосистем. В ее пределах находятся природные зоны арктических пустынь, тундры, лесотундры, тайги (северной, средней и южной), смешанных и широколиственных лесов, лесостепи, степи, полупустынь, пустынь и субтропических лесов. В России более 46% территории покрыто лесами, около 65% занято многолетней мерзлотой и 21,6% занимают заболоченные территории (Восьмое национальное сообщение..., 2022). По данным карты Биомы России (2018), более 40% территории занимают биомы гор. Доля площади равнинных и горных биомов по отношению к площади территории страны приводится в табл. 1.

Набор и объем возможных экосистемных услуг различается по биомам и зависит от свойств природных систем. Эффективность полярных пустынь с утилитарной точки зрения ниже, чем тундр, а тундр ниже, чем лесных экосистем. Т.к. адаптация является приспособлением к неблагоприятным явлениям, востребованность экосистемных услуг зависит от спектра опасных климатообусловленных явлений.

Табл. 1. Соотношение площадей равнинных и горных биомов в соответствии с зональной растительностью и высотной поясностью в % от территории страны (Биомы России, 2018; Биомы России..., 2022)

Биомы	Равнинные	Горные	Всего
Полярные пустыни	0,40%	0,39%	0,79%
Тундры	8,38%	4,76%	13,14%
Тайга	38,76%	31,86%	70,61%
Широколиственные леса	5,95%	3,35%	9,30%
Субтропические леса	-	0,11%	0,11%
Степи	4,79%	0,20%	5,00%
Пустыни	1,04%	-	1,04%

Меры адаптации на основе экосистем имеют ограничение по эффективности применения, соответственно, список опасных явлений, ущерб от которых может быть снижен, сужается. Например, экосистемные услуги не позволяют предотвратить или уменьшить ущерб в результате формирования ледяной корки; тундровая растительность не способна гасить скорость ветра, как это происходит под пологом леса, и др. Кроме того, использование экосистемных услуг для адаптации в каждой природной зоне будет зависеть от выбранного объекта (табл. 2).

Изменения климата:**причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования****Табл. 2.** Экосистемные услуги и их потенциальное использование

Наземные экосистемы	Опасные климатообусловленные явления	Доступные для адаптации экосистемные услуги	Применение
Полярные пустыни	Экстремально низкие температуры, сильные ветра, деградация мерзлоты, разрушение берегов	Уменьшение скорости деградации мерзлоты и эрозии	Защита зданий и инфраструктуры от последствий деградации мерзлоты
Тундры	Экстремально низкие температуры, сильные ветра, деградация мерзлоты, ледяная корка, разрушение берегов, наводнения, природные пожары	Уменьшение скорости деградации мерзлоты и эрозии	Защита зданий и инфраструктуры от последствий деградации мерзлоты. Поддержание оленеводства и традиционного образа жизни коренных народов за счет предотвращения деградации пастбищ на мерзлоте
Тайга	Деградация мерзлоты, волны жары и холода, лесные пожары, засухи, наводнения, ураганы и ветровалы	Уменьшение скорости деградации мерзлоты и эрозии, выравнивание амплитуды суточных температур под пологом леса, уменьшение скорости ветра, уменьшение интенсивности наводнений, поддержание гидрологического режима рек, сохранение влажности почвы и уменьшение эффекта засух	Использование лесных массивов и озеленения для улучшения здоровья населения за счет понижения дневных температур. Защита зданий и инфраструктуры от последствий деградации мерзлоты, снижение скорости ветра, интенсивности наводнений, эрозии. Поддержание оленеводства и традиционного образа жизни коренных народов за счет предотвращения деградации пастбищ на мерзлоте. Поддержание сельского хозяйства за счет снегонакопления на полях и уменьшения ветровой и водной эрозии. Поддержание сельского и лесного

Продолжение таблицы 2

Наземные экосистемы	Опасные климатообусловленные явления	Доступные для адаптации экосистемные услуги	Применение
			хозяйства за счет накопления влаги в почве и стабилизации гидрологического режима рек
Широколиственные леса	Волны жары, лесные пожары, засухи, наводнения, ветровалы	Уменьшение эрозии, выравнивание амплитуды суточных температур под пологом леса, уменьшение скорости ветра, уменьшение интенсивности наводнений, поддержание гидрологического режима рек, сохранение влажности почвы	Использование лесных массивов и озеленения для улучшения здоровья населения за счет понижения дневных температур. Защита зданий и сооружений за счет снижения скорости ветра, интенсивности наводнений, эрозии Поддержание сельского хозяйства за счет снегонакопления на полях и уменьшения ветровой и водной эрозии. Поддержание сельского и лесного хозяйства за счет накопления влаги в почве и стабилизации гидрологического режима рек
Субтропические леса	Волны жары, лесные пожары, засухи, наводнения, ветровалы	Уменьшение эрозии, выравнивание амплитуды суточных температур под пологом леса, уменьшение скорости ветра, уменьшение интенсивности наводнений, поддержание гидрологического режима рек, сохранение влажности почвы	Использование лесных массивов и озеленения для улучшения здоровья населения за счет понижения дневных температур. Защита зданий и сооружений за счет снижения скорости ветра, интенсивности наводнений, эрозии Поддержание сельского хозяйства за счет снегонакопления на полях и уменьшения ветровой и водной эрозии.

Изменения климата:**причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования***Продолжение таблицы 2*

Наземные экосистемы	Опасные климатообусловленные явления	Доступные для адаптации экосистемные услуги	Применение
			шения ветровой и водной эрозии. Поддержание сельского и лесного хозяйства за счет накопления влаги в почве и стабилизации гидрологического режима рек
Степи	Волны жары, природные пожары, засухи, наводнения, пыльные бури	Уменьшение водной и ветровой эрозии, предотвращение и уменьшение интенсивности пыльных бурь; водорегулирующие и водосберегающие функции	Использование лесных массивов и озеленения для улучшения здоровья населения за счет понижения дневных температур. Поддержание сельского и лесного хозяйства за счет накопления влаги в почве и стабилизации гидрологического режима рек. Снижение ущерба от пыльных бурь за счет закрепления почв растительностью
Пустыни	Волны жары, природные пожары, засухи, пыльные бури	Уменьшение водной и ветровой эрозии, предотвращение и уменьшение интенсивности пыльных бурь	Использование лесных массивов и озеленения для улучшения здоровья населения за счет понижения дневных температур. Поддержание сельского и лесного хозяйства за счет накопления влаги в почве и стабилизации гидрологического режима рек. Снижение ущерба от пыльных бурь за счет закрепления почв растительностью

Окончание таблицы 2

Наземные экосистемы	Опасные климатообусловленные явления	Доступные для адаптации экосистемные услуги	Применение
Горные	Экстремально низкие температуры, Дегра- дация мерзлоты, вол- ны жары и холода, лесные пожары, засу- хи, наводнения, урага- ны и ветровалы, лави- ны, сели, оползни	Уменьшение скорости деградации мерзлоты и эрозии, выравнива- ние амплитуды суточ- ных температур под пологом леса, умень- шение скорости ветра, уменьшение интен- сивности наводнений, поддержание гидро- логического режима рек, сдерживание и предотвращение селей и оползней	Защита зданий и ин- фраструктуры от по- следствий деградации мерзлоты, снижение скорости ветра, ин- тенсивности наводне- ний, эрозии. Использование лес- ных массивов, нена- рушенной кустарни- ковой и травянистой растительности для стабилизации скло- нов. Поддержание сель- ского и лесного хо- зяйства за счет нако- пления влаги в почве и стабилизации ги- дрологического ре- жима рек

Стоимостная оценка эффективности адаптации на основе экосистем в России еще не проводилась. Отдельные исследования подтверждают, что совокупность предоставляемых экосистемных услуг может быть в 6 и более раз выше, чем стоимость природных ресурсов, которые можно получить с гектара малонарушенных экосистем – древесины, торфа и т.д. (Неверов, Варапаева, 2013). Например, стоимость сосняков в эксплуатационных лесах составила 15 065 руб./га (продукционные экосистемные функции), в защитных – 124 640 руб./га (регулирующие экосистемные функции), т.е. различие более чем в 8 раз (Фарбер и др., 2022).

Начиная с конца 1990-х гг. была предпринята попытка комплексно или частично монетизировать стоимости экосистемных услуг и ресурсов порядка 25 ООПТ различных категорий и статуса, расположенных в 14 регионах России. Результаты малосопоставимы по причине использования авторами исследований разных подходов (чаще всего применялась концепция общей экономической ценности), методик и масштаба. Соответственно, результаты варьировали от 1 до 60 млн. руб. (Zavadskaya et al., 2017).

Для Кроноцкого заповедника на Камчатке водорегулирующие функции были оценены в 24 460 млн руб./год; предотвращение природных катастроф – 18 450 млн руб./год; сохранение почв – 2 286 млн руб./год, что в совокуп-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ности составляет 35% от общей стоимости оцененных экосистемных услуг, предоставляемых ежегодно (Zavadskaya et al., 2017). Для национального парка «Лосиный остров» суммарная стоимость только водорегулирующей функции лесов составляет 1,97 млрд. руб. (Лелькова, Пакина, 2020). Для Ленинградской и Калининградской областей отепляющий эффект болот региона был оценен в 1,3-7,2 млрд. руб./год, стоимость услуг леса по борьбе с эрозией 1,6-27,7 млрд. руб./год, водорегулирующая функция – 1,1-2,2 млрд. руб./год (Кулаковская, Санин, 2021). Для совокупности ООПТ Республики Коми (таежная зона) водорегулирующая экосистемная функция оценена в 497,7 млн. руб. ежегодно, а защита от эрозии – в 1 935,3 млн. руб. (Тихонова, Щенявский, 2021). Для широколиственных и хвойных лесов заказника «Байдарский» стоимость водорегулирующих услуг оценена в 7 338 тыс. долларов в год, почвенно-защитных – в 381 тыс. долларов в год (Малышев, Панкеева, 2017).

Для степных экосистем, которые сохранились исключительно в пределах ООПТ, водорегулирующая функция (расчет снижения потерь стока рек при распашке и эрозии степных склонов через затраты на компенсацию) была оценена в 90-150 руб./га в год, почвозащитная (расчет затрат на работы по защите склонов от эрозии и рекультивации нарушенных земель и предотвращение риска эрозии) – 150-2000 руб./га в год, климаторегулирующая (оценка возможных потерь «урожая на корню» за счет действия климатических факторов (недостаток/избыток тепла и влаги), «недобор» урожая зерновых, сена в аномальные по климату годы) – 60-90 руб./га в год (Тишков, 2010).

Для Валдайского (таежная зона) и Центрально-Черноземного (широколиственные леса и степи) водорегулирующие (обеспечение стока, снижение объемов потерь воды, расчет через компенсацию) экосистемные услуги оценены в 30-50 долларов/га, почвозащитные (снижение риска эрозии, через затраты на восстановление эродированных земель) – 5-40 долларов/га ежегодно (Тишков и др., 2017).

Потенциал экосистемных функций лесов для адаптации. Важность лесов как защитного механизма от неблагоприятных природных явлений была осознана достаточно давно. В России в 1888 г. «Положением о сбережении лесов» была учреждена категория защитных лесов, к которым относились водоохранные и противоэрозионные леса (Кобяков и др., 2013). Сохранение, восстановление и адаптация лесов к изменениям климата в настоящее время рассматривается как метод адаптации и снижения ущерба от стихийных бедствий для крупных районов: ландшафтов, бассейнов рек и т.д. При этом леса составляют каркас их экологической устойчивости (Spathelf et al., 2018).

В соответствии с Лесным кодексом Российской Федерации (Лесной кодекс..., 2006): «к защитным лесам относятся леса, которые являются природными объектами, имеющими особо ценное значение, и в отношении которых устанавливается особый правовой режим использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов». Выделяется пять категорий защитных лесов: 1) леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях; 2) леса, расположенные в водоох-

ранных зонах; 3) леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов; 4) ценные леса; 5) городские леса. Кроме того, в Лесном кодексе говорится о возможности выделения особо защитных участков лесов в пределах территории защитных, эксплуатационных и резервных.

Напрямую выделение защитных лесов или особо защитных участков лесов для адаптации к изменениям климата в Лесном кодексе не указано, упоминание климаторегулирующей функции лесов есть только в лесотундровых лесах и ленточных борах. Частично могут рассматриваться как адаптационные из защитных лесов: леса, расположенные в водоохранных зонах (поддержание гидрологического режима и защита от наводнений): леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов (защита от сильных ветров, наводнений и т.д.); городские леса (защита от волн жары, создание комфортного микроклимата); ценные леса (ряд климаторегулирующих и защитных функций). Следует также упомянуть: 1) государственные защитные лесные полосы; 2) противозерозионные леса; 3) пустынные, полупустынные леса; 4) лесостепные леса; 5) лесотундровые леса; 6) горные леса; 10) ленточные боры; 11) запретные полосы лесов, расположенные вдоль водных объектов (Лесной кодекс, 2006).

Из особо защитных участков лесов: берегозащитные, почвозащитные участки лесов, расположенных вдоль водных объектов, склонов оврагов (защита от эрозии, наводнений, поддержание гидрологического режима), а также опушки лесов, граничащие с безлесными пространствами (поддержание микроклимата для сохранения лесных экосистем на границе произрастания, защита от сильных ветров).

Категории земель с наибольшим потенциалом применения для адаптации. Помимо ООПТ и защитных лесов потенциалом применения для адаптации к изменениям обладают и некоторые другие категории земель, антропогенное воздействие на которые ограничено. По состоянию на 2018 г. потенциалом для использования в адаптации на основе экосистем обладали следующие категории охраняемых природных территорий (Стишов, Дадли, 2018; табл. 3):

Табл. 3. Категории и площади территорий – потенциал адаптации на основе экосистем

Категория	Площадь, тыс. га	% площади страны
ООПТ (без морской акватории)	200 683,4	11,72
Охранные зоны ООПТ (без морской акватории)	8 960,9	0,52
Территории традиционного природопользования (ТТП)	214 291,6	12,51
Защитные леса	278 533,5	16,27
Воспроизводственные участки или зоны покоя в охотхозяйствах	90 650,1	5,29

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Крупнейшие проекты адаптации на основе экосистем. Наиболее масштабным реализованным проектом по адаптации на основе экосистем в мире является «Зеленый пояс» вдоль шоссе через пустыню Такла-Макан (Китай). 446 км дороги проходит через незакрепленные песчаные массивы. Постоянные песчаные заносы значительно осложняли транспортное сообщение, а традиционные заграждения оказались малоэффективными. С 2000 г. начала применяться инновационная технология: комплексные зеленые насаждения с регулярным поливом из подземных источников. Созданная искусственная экосистема выполняет защитные функции, хотя проблемы по-прежнему остаются: необходимость полива, дороговизна поддержания дороги в условиях регулярных пыльных бурь (Li et al., 2021).

Частично реализован еще более масштабный проект – Великая зеленая стена (The Great Green Wall; Goffner et al., 2019). 50 лет назад она планировалась как лесополоса, отделяющая зону Сахель от Сахары, длиной более 7000 км (от Сенегала до Эфиопии) и шириной 15 км. Позднее концепция лесопосадок была преобразована в систему различного типа ландшафтов, выполняющих защитные функции, которая включает особо охраняемые природные территории и сельскохозяйственные земли (Goffner et al., 2019). В последнее время интерес к проекту и его финансирование возобновилось для использования экосистемной функции поглощения и накопления углерода (Tucker et al., 2023).

В России к проектам аналогичного масштаба, имеющим в том числе адаптационную составляющую, можно отнести «Южный лесной пояс России» (рис. 2). Восстановление лесов на южной границе их произрастания проводится для снижения ветровой эрозии, уменьшения ущербов от засуховеев, создания благоприятного микроклимата. Тем самым создаются более комфортные условия для населения и уменьшается ущерб от опасных и неблагоприятных явлений для сельского



Рис. 2. Схема проекта Южный лесной пояс России (Атропов, 2023)

хозяйства. Лесная полоса, шириной 1 км, протянется на 8 000 км через 14 регионов России от Ростовской области до Республики Бурятия и займет 800 000 га. Дополнительный митигационный эффект составит 139 тыс. тонн CO₂ (Атропов, 2023). Уже посажено более 126 тысяч молодых деревьев в 8 регионах. Как минимум первые 2-3 года за саженцами обеспечен обязательный уход (Петрова, 2022).

Заключение

В нашей стране накоплен опыт как по изучению, так и по использованию экосистемных услуг для адаптации к изменению климата. Задача состоит в эффективном применении мер по адаптации на основе экосистем с учетом не только наблюдаемых, но и прогнозируемых изменений климата.

В условиях современных изменений климата значимость адаптационных экосистемных функций лесов возрастает многократно, т. к. вносит вклад в минимизацию ущерба от стихийных бедствий, обеспечение продовольственной и экологической безопасности значительных территорий. Из более 60-ти региональных планов адаптации к изменениям климата экосистемные услуги упоминались только в перечне мероприятий Москвы (Проект распоряжения..., 2023): Проработка механизма обязательного озеленения части площадей, высвобождающихся от старой застройки (не менее 15 %) для повышения адаптационного потенциала города Москвы за счет увеличения озелененных территорий. Разработка механизма учета экосистемных услуг в системе градостроительной деятельности, в том числе в механизме компенсационного озеленения и при проектировании озелененных пространств.

Наибольшим потенциалом для адаптации на основе экосистем обладают ООПТ категорий заповедник, национальный парк, природный парк, заказник. По состоянию на 2023 г. их насчитывалось 11931, общей площадью 244,3 млн га. Многие категории защитных лесов изначально создавались для защиты или предотвращения опасных явлений и их последствий. В 2023 г. их площадь по данным Росстата составляла 284,6 млн га.

Необходимо максимально эффективно включить имеющийся потенциал экосистемных услуг в региональные планы адаптации.

Литература

1. Атропов М. Проекты по восстановлению лесов в СССР и России, 2021. https://ecowiki.ru/articles/proekty-po-vostanovleniyu-lesov-v-sssr-i-rossii/?sphrase_id=18253
2. Биомы России. Карта. Масштаб 1:7 500 000 / под ред. Г.Н. Огуреевой. Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова; Русское Географическое Общество, 2018 (Для высших учебных заведений).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

3. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы. Под ред. Г.Н. Огуревой. М.: ИГКЭ, 2020. 623 с.

4. Бобылев С.Н., Захаров В.М. Экосистемные услуги и экономика. М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития/Центр экологической политики России, 2009. 72 с.

5. Восьмое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2022. 345 с.

6. КБР. Экосистемный подход. Пятое совещание Конференции Сторон Конвенции о биологическом разнообразии. Найроби (Кения), 15–26 мая 2000 г. Решение V/6. 2020.

7. КБР. Биоразнообразие и изменение климата: подходы с позиций экосистем к адаптации к изменению климата и уменьшению опасности стихийных бедствий. Двадцать второе совещание. Монреаль, Канада, 2–7 июля 2018 г. 2018а

8. КБР. Конференция сторон Конвенции о биологическом разнообразии. Четырнадцатое совещание. Шарм-эш-Шейх, Египет, 17-29 ноября 2018 года. Пункт 21 повестки дня. Биоразнообразие и изменение климата. 2018б.

9. Климатическая доктрина Российской Федерации. Утверждена указом Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812.

10. Кобяков К., Лепешкин Е., Титова С. Защитные леса: получится ли их сохранить? // Устойчивое лесопользование, 2013. № 1 (34). С. 34-44.

11. Кулаковская, В.А., Санин, А.Ю. К вопросу об экономической оценке экосистемных услуг, оказываемых геосистемами прибрежной зоны Балтийского моря. Государственное управление. Электронный вестник, 2021. №86. С. 115-140.

12. Лелькова А.К., Пакина А.А. Оценка экосистемных функций национально-го парка «Лосиный остров» // Экосистемы: экология и динамика, 2020. Т.4, №3. С. 166-179.

13. Лесной кодекс Российской Федерации Утвержден 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 04.08.2023).

14. Малышев Т.Р., Панкеева Т.В. Оценка экосистемных услуг природного заказника «Байдарский» // I Международный экологический форум в Крыму, 20-24 июня 2017 г. Севастополь: Фонд им. Вернадского. С. 68-71.

15. Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия //Фундаментальная и прикладная климатология, 2017. Т. 4. С. 79-101.

16. Неверов А.В., Варапаева О.А. Стоимостная оценка экосистемных услуг и биологического разнообразия // Труды БГТУ, 2013. Серия 5: Экономика и управление. №7. С. 95-100.

17. Петрова О. За весну проект «Посади лес» восстановил более 400 тысяч деревьев. 2022. <https://les.media/articles/999796-za-vesnu-proekt-posadi-les-vosstanovil-bolee-400-tysyach-derevev>

18. Проект распоряжения Правительства Москвы «Об утверждении перечня мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям». 02.06.2023. <https://www.mos.ru/eco/documents/view/17982221/>

19. РКИК ООН, 2013. Вспомогательный орган для консультирования по научным и техническим аспектам. Тридцать восьмая сессия Бонн, 3–14 июня 2013 г. Пункт 3 предварительной повестки дня Найробийская программа работы в области воздействий изменения климата, уязвимости и адаптации. Доклад о работе технического рабочего совещания по основанным на экосистемах подходам к адаптации к изменению климата. 31 с.

20. Стишов М.С., Дадли Н. Охраняемые природные территории России и их категории. М.: Типография ПМГ, 2018. 248 с.

21. Тихонова Т.В., Щенявский В.А. Учет экосистемных услуг в оценке ресурсоэффективности особо охраняемых природных территорий Республики Коми // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2021. Т. 14, №1, С. 110-124.

22. Тишков А.А. Биосферные функции и экосистемные услуги ландшафтов степной зоны России // Аридные экосистемы, 2010. Т. 16, № 41. С. 5-15.

23. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н., Царевская Н.Г. Экосистемные услуги национальных парков и заповедников: оценка, сопоставление, выявление конфликтов при пользовании // Охрана природы и региональное развитие: гармония и конфликты (к Году экологии в России), 2017. С.60-70.

24. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».

25. Фарбер С.К., Мартынов А.А., Соколова Н.В. Относительная стоимость экосистемных функций насаждений // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022. Т. 4. С. 257-262.

26. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / Ред.-сост. Е.Н. Букварева, Д.Г. Замолотчиков. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.

27. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (eds.). Nature-based Solutions to address global societal challenges // Gland, Switzerland: IUCN, 2016. xiii + 97 pp.

28. Goffner, D., Sinare, H., Gordon, L.J. The Great Green Wall for the Sahara and the Sahel Initiative as an opportunity to enhance resilience in Sahelian landscapes and livelihoods // Regional Environmental Change, 2019. Т.19, 1417-1428.

29. IPBES. The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Rounsevell M, Fischer M, Torre-Marín Rando A, Mader A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany; 2018. 892 p.

30. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 2019. 1148 p.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

31. IPCC: Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2001. 1032 p.

32. IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014; p. 1132.

33. IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. 2022. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

34. IUCN. Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. First edition. Gland, Switzerland: IUCN. 2020. 30 p.

35. Li C., Wang Y., Lei J., Xu X., Wang S., Fan J., Fan S. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China. Journal of Arid land, 2021. №13. С. 98-106.

36. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. 155 p. <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>

37. Spathelf P., Stanturf J., Kleine M., Jandl R., Chiatante D., Bolte A. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration // Annals of Forest Science. 2018. V. 75. No 2. P. 55.

38. TEEB (2010) The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. 39 p. https://www.biodiversity.ru/programs/international/teeb/materials_teeb/TEEB_SynthReport_English.pdf

39. UNEP. Guidelines for Integrating Ecosystem-based Adaptation into National Adaptation Plans: Supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines. Nairobi. 2021. 128 p.

40. Zavadskaya A., Nikolaeva E., Sazhina V., Shpilenok T., Shuvalova O. Values and Ecosystem Services of Kronotsky Reserve and South Kamchatka Sanctuary / S. Bobilev Editor. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Publishing House «Kamchatpress», 2017. 244 p.

ОБ ОСНОВНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

Е.И. Белов

*Агентство стратегических инициатив
eugene.i.belov@gmail.com*

Аннотация. Разработка региональных планов адаптации в 2022-2024 годах выполнялась и продолжает выполняться региональными органами исполнительной власти в условиях дефицита кадров, полномочий, финансовых и иных ресурсов. Следствием подобного положения дел является явное несовершенство региональных планов как основы для успешной адаптации к изменениям климата населения регионов и его экономики. Анализ управленческих практик и выявление наилучших из них необходимы для масштабирования подобного опыта на федеральном уровне, постановки успешной работы по актуализации региональных планов, намеченной на 2024-2025 годы, эффективной реализации заложенных в плане адаптационных мероприятий.

Ключевые слова: адаптация к изменениям климата, региональные планы адаптации к изменениям климата, государственное управление, региональное управление

Для подготовки региональных планов адаптации к изменениям климата в качестве методологической основы были подготовлены следующие нормативные документы: Приказ Минэкономразвития России № 267 от 13.05.2021 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата» (включает методические рекомендации по оценке климатических рисков, в том числе для территорий) и Распоряжение Минприроды России № 16-р от 19.05.2021 «Об утверждении Типового паспорта климатической безопасности территории субъекта Российской Федерации».

Соответственно в 2022 году региональные органы исполнительной власти (РОИВ) большинства субъектов России приступили к разработке региональных планов. Данная работа выполнялась в условиях кадрового и финансового дефицита¹, объективного дефицита информации как в части самих климатиче-

¹ По данным интервью с сотрудниками региональных органов исполнительной власти (РОИВ).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ских прогнозов (а в ряде случаев – даже ретроспективных метеоданных²), так и в части влияния изменений климата на ключевые хозяйственные комплексы, объекты и виды инфраструктуры³, социальные системы, а также оценок ущерба от неблагоприятных гидрометеорологических явлений, вызванных изменениями климата^{4, 5}. В частности, сотрудники ряда РОИВ не знакомы с публикациями и другими полезными ресурсами научных институтов Росгидромета, находящимися в открытом доступе, в том числе со сценарными прогнозами изменений климата на сайте Климатического центра Росгидромета, исследованиями Института глобального климата и экологии, Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (опубликованы данные наблюдений на реперных метеорологических станциях, для некоторых рассчитаны полезные отраслевые метеорологические индексы). Значительная часть информации для оценки климатических рисков должна была уже содержаться в паспортах региональной безопасности⁶.

Кроме того, для проведения оценок требовалась информация о важных объектах, которые могут пострадать в результате климатических рисков: их стоимости, состоянии и уязвимости. Данная информация ранее в большинстве рассмотренных регионов никогда не собиралась⁷. Информация об ущербах в результате опасных и неблагоприятных климатообусловленных явлений фрагментарна. Прогнозы возможных ущербов в результате реализации климатических рисков на региональном уровне ранее не составлялись.

К числу работ по данным вопросам можно отнести публикации по сценарному прогнозированию регионального климата (Катцов и др., 2020), оценкам влияния изменения климата на ключевые отрасли народного хозяйства (Порфирьев и др., 2020). Отдельный корпус исследований посвящен оценкам ущербов для конкретных отраслей и/или видов инфраструктуры в конкретных регионах (табл. 1), качественному описанию инновационных адаптационных практик (Никитина, 2019), трансформации территориально-хозяйственных комплексов (Svetlov et al., 2019).

В условиях значительной природно-климатической и социально-экономической дифференциации у субъектов РФ будут собственные приоритеты и варианты приспособления к изменениям климата (Обязов, 2010; Катцов, 2011; Порфи-

² Аналогично.

³ Аналогично.

⁴ Аналогично.

⁵ Сама проблема дефицита информации носит глобальный характер [1].

⁶ В соответствии с приказом Министерства чрезвычайных ситуаций от 25 октября 2004 г. № 484 «Об утверждении типового паспорта безопасности территорий субъектов Российской Федерации и муниципальных образований»; при этом работа по сбору и обновлению данных системно не выполнялась.

⁷ В ряде регионов (Вологодская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, Сахалинская область) реальными держателями ключевой (хотя и неполной) информации являются не РОИВ, а крупные компании, как правило, нефтегазовой и энергетической, горнодобывающей и металлургической, транспортной специализации.

⁸ Подобная пассивность, однако, не является повсеместной: автор настоящего исследования совместно с представителями РОИВ Сахалинской области и Республики Крым провел анкетирование региональных интеллектуальных центров; в общей сложности было получено 20 содержательных откликов, информация из которых была использована при разработке региональных планов.

рьев, 2011; Гашо, 2017; Порфирьев, 2020; Хлебников и др., 2021), показано, что для ряда регионов – в первую очередь наиболее уязвимых к изменениям климата – управление климатическими рисками должно стать важной составляющей операционной деятельности органов исполнительной власти и одним из приоритетов социально-экономического развития (Романовская, 2022). Целесообразность разработки региональных планов адаптации к изменениям климата лишь подчеркивается растущим ростом ущерба от изменений климата (Порфирьев, 2011; Романовская, 2022).

Информационную базу настоящего исследования составили планы адаптации 38 регионов (табл. 2), утвержденные по состоянию на 1.03.2023.

В общей сложности в рассматриваемых планах содержится 1367 мероприятий. Число адаптационных мероприятий в региональных планах отличается на порядок: от 8 в планах Псковской области и Севастополя до 85 в плане Курской области (при среднем медианном значении 32 мероприятия).

Табл. 1. Оценка затрат на восстановление и поддержание фондов в связи с деградацией вечной мерзлоты в период с 2021 г. по 2050 г., млрд руб. в год

Сегмент / Регион	Республика Коми	Ненецкий автономный округ	Ханты-Мансийский автономный округ	Ямало-Ненецкий автономный округ	Красноярский край	Республика Саха – Якутия	Магаданская область	Чукотский автономный округ	Итого по сегменту
Жилой фонд	2,99	4,09	0,09	17,88	6,57	4,47	0,13	0,04	36,26
Объекты системы здравоохранения	0,21	0,16	0,01	0,91	0,61	0,30	0,02	0,004	2,23
Дороги	1,09	0,35	0,11	1,19	2,71	18,87	1,84	2,63	28,79
Аэропорты	0,40	0,20	н/д	1,90	0,50	1,10	н/д	1,90	6,00
Морские порты	-	0,80	-	2,16	0,90	0,15	н/д	1,73	5,74
Газодобывающая инфраструктура	н/д	н/д	н/д	29,16	н/д	н/д	-	-	29,16
Нефтедобывающая инфраструктура (в период с 2036 г. по 2050 г.)	н/д	20,07	79,94	74,35	30,33	н/д	-	-	204,69
Итого по региону	4,69	25,66	80,15	127,55	41,62	24,892	1,99	6,30	

Источник: составлено по данным (Порфирьев и др., 2021 (а); Порфирьев и др., 2021 (б); Порфирьев и др., 2019; Елисеев, 2020; Елисеев, 2021 (а); Елисеев, 2021 (б); Порфирьев и др., 2022 (а); Порфирьев и др. 2022 (б)).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Подобный разброс объясняется следующими обстоятельствами:

- фактической дифференциацией субъектов РФ в части уязвимости к изменениям климата;
- принципиально разным уровнем проработки региональных климатических рисков (что в свою очередь обусловлено уровнем мотивации и компетентности ключевых сотрудников органов исполнительной власти, привлечением бизнеса, привлечением интеллектуальных центров – научно-исследовательских институтов, университетов, лабораторий и пр. – к разработке планов);
- нюансами трактовки основных положений методических рекомендаций по вопросам адаптации, утвержденных Министерством экономического развития РФ (с чем в свою очередь связано обилие типовых («шаблонных») мероприятий в планах ряда регионов, излишняя детализация или напротив агрегация традиционных отраслевых сюжетов, наличие верхнеуровневых декларативных мероприятий или упоминание стандартной оперативной работы профильных ведомств).

Табл. 2. Доля адаптационных мероприятий в региональных планах адаптации к изменениям климата

Регион	Доля собственно адаптационных мероприятий	Доля адаптационных мероприятий, мероприятий с адаптационным эффектом, мероприятий-«прекурсоров» адаптации
Архангельская область	28,6%	76,2%
Белгородская область	34,4%	59,4%
Владимирская область	0,0%	62,5%
Волгоградская область	18,8%	34,4%
Вологодская область	11,1%	22,2%
Ивановская область	24,0%	52,0%
Кабардино-Балкарская Республика	23,3%	53,3%
Кемеровская область	27,3%	40,9%
Костромская область	33,3%	66,7%
Курская область	29,4%	49,4%
Липецкая область	23,1%	36,5%
Ненецкий автономный округ	14,3%	38,1%
Нижегородская область	20,3%	44,1%
Оренбургская область	28,6%	35,7%

Окончание таблицы 2

Регион	Доля собственно адаптационных мероприятий	Доля адаптационных мероприятий, мероприятий с адаптационным эффектом, мероприятий-«прекурсоров» адаптации
Пензенская область	32,4%	48,6%
Псковская область	50,0%	75,0%
Республика Башкортостан	20,5%	41,0%
Республика Бурятия	21,9%	46,9%
Республика Дагестан	19,0%	33,3%
Республика Калмыкия	27,8%	47,2%
Республика Крым	47,8%	69,6%
Республика Марий Эл	13,6%	59,1%
Республика Мордовия	25,0%	69,4%
Республика Саха (Якутия)	25,4%	52,4%
Ростовская область	18,4%	47,4%
Рязанская область	23,3%	43,3%
Самарская область	25,0%	50,0%
Сахалинская область	35,9%	71,8%
Свердловская область	17,6%	23,5%
Севастополь	25,0%	62,5%
Томская область	21,1%	68,4%
Тульская область	22,5%	40,0%
Ульяновская область	33,3%	62,5%
Хабаровский край	26,9%	61,5%
Челябинская область	27,3%	60,6%
Чеченская Республика	25,4%	41,8%
Чувашская Республика	14,6%	43,8%
Ямало-Ненецкий автономный округ	24,0%	66,0%

Источник: составлено автором по данным региональных планов адаптации к изменениям климата, (Белов, 2023).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

В ходе серии интервью с представителями РОИВ (общим числом – 24 региона; охвачены все федеральные округа) было установлено следующее:

- в 12 регионах были созданы тематические рабочие группы (или налажены достаточные неформальные коммуникации без официального утверждения);

- в 7 регионах было выделено финансирование выполнения научно-исследовательских работ, предшествующих разработке и утверждению регионального плана адаптации к изменениям климата;

- в 16 регионах были проблемы в части межведомственного взаимодействия при сборе материалов и предложений, необходимых для разработки регионального плана; часто чиновники, ответственные за подготовку плана, обращают внимание на закрытость коллег из министерств сельского хозяйства и министерств чрезвычайных ситуаций (с точки зрения теории управления интересно отметить, что в ряде случаев не столько формальные процедуры, сколько наличие личных контактов помогало решать поставленные задачи);

- в 12 регионах местные РОИВ пытались наладить взаимодействие с местными интеллектуальными центрами – вузами, научно-исследовательскими институтами, управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (аналогично для сбора материалов и предложений), заповедниками и пр.; в половине случаев подобное взаимодействие не отличалось интенсивностью, носило явно недостаточный характер⁸; часто представители РОИВ сетуют на недоступность данных Росгидромета и нежелание представителей УГМС идти на контакт;

- еще реже встречаются практики привлечения бизнеса и некоммерческих организаций к подготовке плана: 9 регионов взаимодействовали крупными корпоративными партнерами или деловыми ассоциациями; дополнительным ограничением самой целесообразности такого взаимодействия служат юридические ограничения в части дополнения перечня адаптационных мероприятий бизнес-инициативами;

- совсем редко встречается поставленное системное взаимодействие РОИВ с муниципальными властями как на уровне подготовке регионального плана, так и уровне его фактической реализации: лишь 4 региона обозначили свое сотрудничество с местными администрациями, еще 2 заявили о взаимодействии с муниципалитетами выборочно.

Анализ опыта работ, проведенных региональными органами исполнительной власти в 2022-2024 гг., необходимо использовать для совершенствования нормально-правовой базы, касающейся разработки и фактической реализации региональных планов адаптации, а также разработки и совершенствования схем финансирования выполнения данных работ. В противном случае трудно рассчитывать на качественное улучшение региональных планов (к которым в целом ряде субъектов относятся как к «формальным, ненужным документам») с одной стороны и фактически успешную адаптацию регионального хозяйства – с другой.

Литература

1. Макаров И.А. Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2013. – Т. 17, № 3. – С. 479-496.
2. Катцов В.М., Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л. Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике РФ // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 46-58.
3. Порфирьев Б.Н., Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М. [и др.]. Изменение климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы : Российская академия наук, Институт народнохозяйственного прогнозирования. – Москва : ООО «Научный консультант», 2022. – 514 с.
4. Никитина Е.Н. Изменение климата в Арктике: адаптация в ответ на новые вызовы // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. – 2019. – Т. 12, № 5. – С. 177-200.
5. Svetlov N.M., Siptits S.O., Romanenko I.A., Evdokimova N.E. The Effect of Climate Change on the Location of Branches of Agriculture in Russia // Studies on Russian Economic Development. – 2019. – Vol. 30, No. 4. – P. 406-418.
6. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91, № 2. – С. 105-114.
7. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации многолетней мерзлоты для объектов системы здравоохранения российской Арктики // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91, № 12. – С. 1125-1136.
8. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 12. – С. 1228-1239.
9. Елисеев Д.О. Оценка экономического ущерба от последствий деградации вечной мерзлоты на дорожную инфраструктуру арктических регионов России на основе динамической модели // Modern Economy Success. – 2020. – № 4. – С. 147-154.
10. Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Влияние последствий деградации многолетней мерзлоты на функционирование аэродромов Арктической зоны РФ: анализ и прогноз // Экономика и предпринимательство. – 2021. – № 9(134). – С. 494-499.
11. Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Экономическая оценка последствий деградации многолетней мерзлоты для инфраструктуры морских портов российской Арктики // Экономика и предпринимательство. – 2021. – № 10(135). – С. 504-509.
12. Порфирьев Б.Н., Колпаков А.Ю., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. // Оценка и прогноз издержек газодобывающего сектора Ямало-Ненецкого автономного

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

округа, связанных с последствиями деградации многолетнемерзлых грунтов // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 5. – С. 96-106.

13. Порфирьев Б.Н., Колпаков А.Ю., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. // Оценка и прогноз дополнительных затрат нефтедобывающих предприятий на снижение рисков от деградации многолетней мерзлоты // Проблемы прогнозирования. – 2022. – № 6(195). – С. 120-130.

14. Обязов В.А. Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. – 2010. – № 2. – С. 34-39.

15. Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. / Под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева. - СПб, Д'АРТ, 2011, 251 с.

16. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М. Последствия изменений климата в России и адаптация к ним (оценка и прогноз) // Вопросы экономики. – 2011. – № 11. – С. 94-108.

17. Приоритеты климатической адаптации мегаполиса: люди, природа, техника. Алгоритм, стратегия и план действий. Научно-методическое издание. Под ред. Е. Гашо. – Москва, 2019 г.

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

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

20. Романовская А.А. Оценка приоритетности территориальных единиц России с целью адаптации к климатическим // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 2. – С. 53-61.

21. Белов Е.И. О разработке региональных планов адаптации к изменениям климата в 2022 году // Сборник материалов XXIII международного экологического форума «День Балтийского моря» и XXII международного форума «Экология большого города» (22-24 марта 2023 года, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург, Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности, 2023. – С. 59-65.



5

**ПРОБЛЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ
АНТРОПОГЕННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КЛИМАТ.
УГЛЕРОДНАЯ НЕЙТРАЛЬНОСТЬ**

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И РАЗРУШЕНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ

С.В. Алексеенко

Институт теплофизики СО РАН

asvasus@yandex.ru

Аннотация. Энергетика - базис экономики любой страны вне зависимости от технологического уклада. Однако сегодня возникла беспрецедентная ситуация, когда необходимо безотлагательно принимать принципиальные решения по дальнейшему развитию мировой энергетики. Причины обусловлены изменениями климата и разрушением озонового слоя Земли, преобладающий вклад в которые вносит деятельность человека, прежде всего, в сфере энергетики. Выполнен анализ существующей ситуации и сформулированы выводы, касающиеся развития низко(без)углеродных энергетических технологий и выбора рабочих тел энергетического оборудования, способствующих снижению их влияния на изменение климата и разрушение озонового слоя Земли.

Ключевые слова: изменение климата, разрушение озонового слоя Земли, энергетические технологии, рабочие тела энергетического оборудования

Изменение климата

Наибольшее влияние на развитие мировой экономики и вообще человеческого сообщества в XXI веке оказало изменение климата, которое выражается в форме глобального потепления (Climate Change, 2021; Мохов, 2022). Основные положения можно изложить следующим образом. Обнаружен рост температуры поверхности Земли, который связывается с глобальным потеплением. На изменение климата влияют разные факторы - парниковый эффект; тропосферные аэрозоли; вулканическая деятельность; солнечная активность; параметры орбиты Земли. Но основной причиной считаются выбросы парниковых газов (прежде всего, CO_2), приводящие к парниковому эффекту. Полагается, что ключевую роль играет антропогенная эмиссия CO_2 , главный вклад в которую вносит энергетика на органическом топливе. Надо сказать, что до сих пор не утихают споры по механизмам изменения климата. Тем не менее, специалисты уверены, что научные доказательства вполне убедительны, хотя даны на вероятностной основе. При

сопоставлении глобальных численных моделей Земной системы (в том числе, Российских) методом исключения продемонстрировано, что только учет антропогенных выбросов парниковых газов дает вклад в изменение температуры, хотя доля человека невелика в сравнении с природой – не более 5% (Climate Change, 2021). Доказательство данного утверждения наглядно представлено на рис. 1. Показано изменение глобальной температуры поверхности Земли с доиндустриального периода времени до наших дней. Здесь, черная линия – наблюдение, коричневое поле – данные по разным численным моделям, отобранных по методу бенчмаркинга на базе CMIP6 (6th phase of the Coupled Model Intercomparison Project – 6-я фаза Проекта по взаимному сопоставлению сопряженных моделей, выполняемого в рамках деятельности МГЭИК (IPCC) - Межправительственной группы экспертов по изменению климата). Коричневая кривая – усреднение по отобранным моделям.

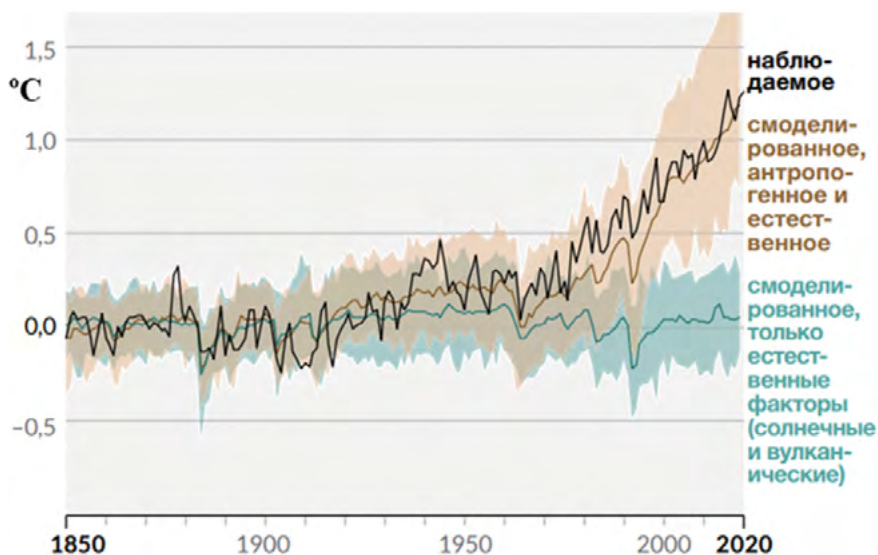


Рис. 1. Изменение глобальной температуры поверхности Земли с доиндустриального периода времени до наших дней

Как видно, усредненная расчетная зависимость достаточно хорошо описывает наблюдаемое изменение температуры вплоть до некоторых деталей. В численных моделях учтены все возможные факторы, влияющие на климат. Если поочередно выкидывать разные факторы из расчетов, расчетная зависимость практически не меняется до того момента, когда из рассмотрения исключаются антропогенные выбросы парниковых газов. В последнем случае поле расчетных данных (голубая область) и усредненная зависимость (синяя линия) концентрируются в окрестности оси абсцисс, демонстрируя таким образом отсутствие изменения температуры. Тем самым иллюстрируется, что только антропогенная эмиссия парниковых газов приводит к изменению глобальной температуры по-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

верхности Земли на данном промежутке времени. Изменение температуры происходит из-за дисбаланса между энергией, поступающей на Землю, и энергией, излучаемой ею в космическое пространство. Эта разница положительная (т.е., Земля поглощает) и в пересчете на плотность потока энергии составляет величину $2,72 [\pm 0,76]$ Вт/м². Данная величина важна в том плане, что часто вклад различных воздействий на изменение климата определяют, как долю этого дисбаланса, пользуясь термином «radiative forcing of climate» - радиационное воздействие на климат (см. рис. 4). Знак вклада различных воздействий может быть как положительным, так и отрицательным.

Но как объяснить влияние малых воздействий на глобальные изменения? Объяснения непростые, но вполне понятные, и обусловлены они обратными связями. Обычная арифметика здесь не поможет. В частности, незначительный рост температуры за счет малых антропогенных выбросов парниковых газов приводит к заметному росту влажности. А вода – это сильный парниковый газ. То есть, малые выбросы CO₂ действуют как спусковой крючок и заставляют «работать» воду. Обратных связей много. В числе наиболее важных – положительная обратная связь лед-альbedo. Чем больше площадь ледового покрова, тем больше отражается падающего на поверхность Земли солнечного излучения, что способствует охлаждению Земли и увеличению площади занятой льдом поверхности, и наоборот. Другой известный пример – явление фертилизации, когда с увеличением концентрации CO₂ в атмосфере наблюдается рост поглощения CO₂ зелеными растениями в процессе фотосинтеза. Здесь имеет место отрицательная обратная связь, способствующая повышению устойчивости климатической системы. Окончательный вывод можно сделать только на основе глобальных численных моделей Земной системы, учитывающих наиболее полно разнообразные обратные связи. Анализ обратной связи между климатом и углеродным циклом демонстрирует положительную обратную связь, которая определяется, в основном, наземными экосистемами (Friedlingstein et al., 2006; Елисеев, 2017).

При выявлении механизмов изменения климата методологически важно учитывать масштабные эффекты (прежде всего, временные), а также типы и сочетание воздействий. В особенности это принципиально при анализе причинно-следственных связей, например, в случае изменений температуры и концентрации CO₂ в атмосфере – что причина, а что следствие? Удобным подходом является применение вейвлет-анализа. Так, в работе (Muryshv et al., 2019) при моделировании голоцена с помощью климатической модели ИФА РАН исследована квадратичная вейвлет-когерентность между температурой и концентрацией CO₂ в атмосфере. Наглядно можно проследить, когда и с каким временным лагом опережает температура, а когда - концентрация углекислого газа. При этом подчеркивается, что лаг между изменениями переменных, определяемый методами корреляционного и регрессионного анализа, не характеризует причинно-следственные связи между ними в общем случае.

Помимо относительно монотонного повышения глобальной средней температуры Земли особо следует обратить внимание на рост экстремальных погодных

явлений регионального масштаба таких как интенсивные осадки, засухи, наводнения, ураганы, экстремально высокие и экстремально низкие температуры (Aleshina et al., 2021). Еще более опасные события могут быть связаны с необратимыми явлениями (critical points или tipping points). Tipping points - критические факторы изменения климата - элементы климатической системы, изменения в которых могут существенно повлиять на климат Земли в целом (иначе - переломные моменты). В теории динамических систем хорошо известны критические явления, когда небольшие пороговые изменения отдельных параметров системы могут приводить к её переходу в качественно другое состояние. Например, бифуркация или воздействие шума. Насчитано около 15 значимых переломных моментов в климатической системе планеты. Наименее устойчивыми к глобальному потеплению и наиболее близкими к точке невозврата являются коралловые рифы, ледяные щиты Западной Антарктики и Гренландии, леса Амазонки. Другие примеры - Эль-Ниньо, Гольфстрим. В пределе Земля может переходить в такие необратимые состояния, какие имеют место на Венере («теплое» состояние) или Марсе (состояние «снежного кома» – «snow ball»). В текущей конфигурации Земля находится в мультистабильном режиме - могут быть реализованы два асимптотических состояния (Budyko, 1969). Теплое состояние, в котором мы находимся, конкурирует с состоянием снежного кома, покрытого льдом. Бистабильность существует благодаря положительной обратной связи лед-альbedo. Модельные расчеты (Lucarini, 2021) показывают, что если стохастически возмущать параметр, управляющий интенсивностью поступающего солнечного излучения, то система выполняет переходы между теплым и снежным состоянием (шум-индуцированные переходы). При этом вводится понятие состояний меланхолии, которые действуют как шлюзы между двумя стабильными состояниями.

Наибольшее внимание в обществе уделяется сценариям и прогнозам изменения климата на период до 2100 года. Для оценки антропогенного вклада в изменение климата можно пользоваться последними данными, представленными в 6 оценочном докладе МГЭИК (Climate Change, 2021) и наглядно изображенными на рис. 2.

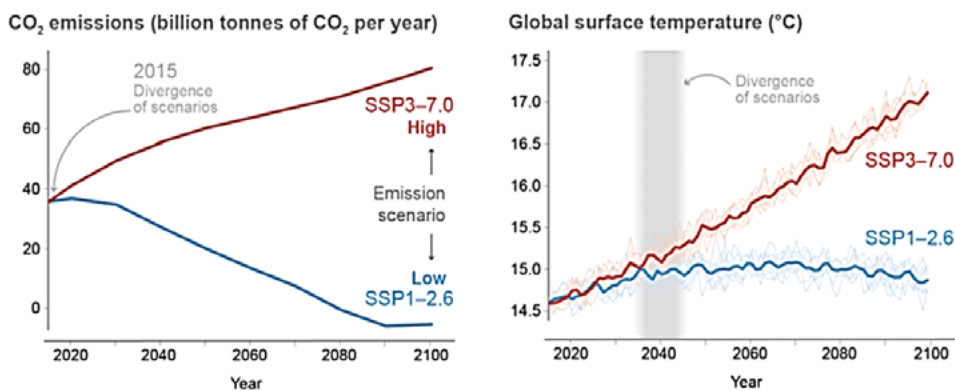


Рис. 2. Влияние эмиссии CO₂ на глобальную температуру поверхности Земли для двух сценариев эмиссии

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Рассмотрены 2 существенно отличающихся сценария выбросов CO_2 и их влияния на концентрацию углекислого газа в атмосфере (на графике не показано) и глобальную температуру поверхности Земли: сценарий с низким уровнем выбросов (SSP1-2.6, синий цвет) и сценарий с высоким уровнем выбросов (SSP3-7.0, красный цвет). В сценарии с низким уровнем эмиссии выбросы CO_2 начинают снижаться в 2020 году до нуля к концу века, в то время как в сценарии с высоким уровнем выбросов они продолжают увеличиваться на протяжении всего 21 века. Толстые линии - это среднее значение десяти отдельных расчетов (тонкие линии) для каждого сценария. Отличия между отдельными моделями отражают естественную изменчивость. Различия для 2 сценариев начинают проявляться через 5 – 10 лет для концентрации CO_2 в атмосфере и через 20 – 30 лет для температуры Земли. Если произойдет крупное извержение вулкана (что ожидается в ближайшие 100 лет), то возникнут сильные возмущения хода температуры, что еще более затруднит анализ климатических изменений.

Разрушение озонового слоя Земли

Касаясь вопроса изменения климата, невозможно обойти стороной разрушение озонового слоя Земли. Большинство людей считает: проблемы с озоновым слоем не существует, и всё это было происками ряда химических концернов. Однако это глубокое заблуждение. Уже более десяти лет не меняются взгляды специалистов на проблему озонового слоя, идут лишь уточнения да принимаются новые поправки и международные соглашения. Исследования проводятся под эгидой Всемирной Метеорологической Организации и результаты публикуются регулярно во внушительных отчетах, последний из которых вышел год назад (Ozone Depletion, 2022). Основные выводы таковы. Показано, что антропогенные выбросы ОРВ (озоноразрушающих веществ) типа фреонов приводят к разрушению озонового слоя Земли и образованию озоновых «дыр» в Антарктике, впервые обнаруженных в 1985 г. Озон распределен сильно неравномерно. 10% озона Земли находится в тропосфере, которая простирается от поверхности примерно на 10 - 15 км, но основная доля озона (90%) приходится на стратосферу - область атмосферы между верхней частью тропосферы и высотой около 50 километров. Часть стратосферы с наибольшим количеством озона называется «озоновым слоем». Толщина этого слоя варьируется от региона к региону и в зависимости от сезона по всему земному шару. Озон образуется за счет реакций фотолиза, которые происходят в стратосфере под воздействием ультрафиолетового излучения. Механизмы образования, а также разрушения озона были предложены Сидни Чепменом в 1930 году и носят его имя. Озон в стратосфере поглощает ультрафиолет, вредный для людей и других форм жизни, поэтому процессы разрушения озона вследствие деятельности человека имеют принципиальную важность. Только хлор и бром разрушают молекулы озона, причем, реакции носят каталитический характер. Один атом хлора Cl или брома Br раз-

рушает тысячи молекул озона. На рис. 3 представлена схема разрушения озона в каталитическом цикле с участием атомов хлора. Такой механизм характерен для тропических и средних широт, где много ультрафиолета. Здесь, атомарный кислород образуется в реакциях Чепмена под действием ультрафиолета, а исходным хлорсодержащим компонентом является химически активный галогеновый газ ClO, возникающий в стратосфере в результате химических превращений газов - источников галогенов с участием ультрафиолетового излучения солнца.

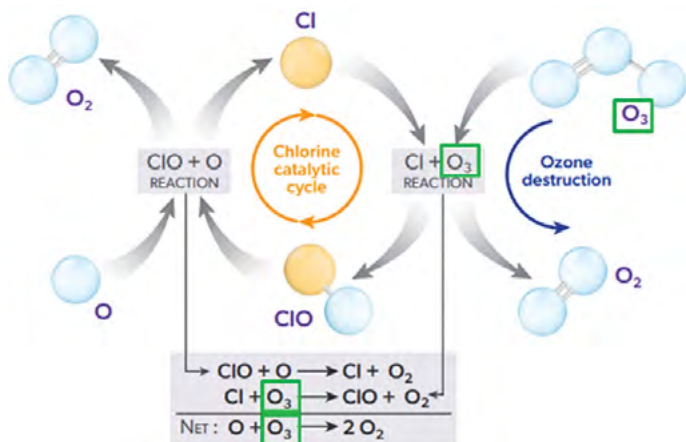


Рис. 3. Схема разрушения озона в каталитическом цикле

Основными антропогенными источниками Cl и Br являются фреоны, среди которых R-11 (CCl_3F), R-12 (CCl_2F_2), R-22 (CHF_2Cl) и многие др. Их классифицируют как озоноразрушающие вещества (ОРВ). В то же время они являются важнейшими промышленными газами с широким применением, в частности, в качестве хладагентов и рабочих тел энергетических установок. Их воздействие на озоновый слой количественно характеризуется Ozone Depletion Potential (ODP), при этом значение 1 присвоено фреону R-11. Особенность большинства фреонов заключается в длительных сроках их жизни - от 1 до 100 лет. В итоге схему разрушения озонового слоя можно представить в виде 6 последовательных стадий. (1) **Эмиссия.** Газы - источники галогенов выбрасываются на поверхность Земли в результате деятельности человека и природных процессов. (2) **Аккумуляция.** Газы - источники галогенов накапливаются в тропосфере и почти не подвергаются химическим потерям. (3) **Перенос.** Газы - источники галогенов переносятся в стратосферу воздушными движениями (атмосферными вихрями). (4) **Преобразования.** Большинство газов - источников галогенов преобразуются в стратосфере в химически активные галогеновые газы (типа ClO) в результате химических реакций с участием ультрафиолетового излучения солнца. (5) **Химические реакции.** Химически активные галогенные газы вызывают химическое истощение стратосферного озона по всему земному шару. Низкотемпературные поверхностные реакции в полярных стратосферных облаках (PSC) значительно

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

увеличивают количество химически активных галогенных газов и тем самым вызывают серьезную потерю озона в полярных регионах в конце зимы и ранней весной. Это есть причина образования озоновых «дыр» в Антарктике, где по ряду причин наблюдаются более низкие температуры в сравнении с Арктикой и другими регионами. (6) Удаление. Воздух, содержащий химически активные галогеновые газы, возвращается в тропосферу, где газы удаляются влагой в облаках и дожде.

После обнаружения озоновых дыр в Антарктике (а затем и фиксации снижения общего содержания озона в атмосфере – сегодня на 2-3% меньше в сравнении со средним показателем 1964 - 1980 годов) мировым сообществом были предприняты незамедлительные меры по ограничению производства и использования ряда ОРВ. Вследствие этого началось медленное восстановление содержания озона в стратосфере. Производство и потребление всех основных ОРВ развитыми и развивающимися странами будет почти полностью прекращено к 2030 году. Появились заменители ОРВ в виде альтернативных фреонов, не содержащих хлора и брома (McLinden and Huber, 2020). Среди них гидрофторуглероды, такие как R-134a (CH_2FCF_3) и 245fa ($\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$), ставшие уже довольно популярными. Но возникла серьезная сопутствующая проблема. Оказывается, существует тесная взаимосвязь между разрушением озонового слоя и изменением климата (Ozone Depletion, 2022). Как озоноразрушающие вещества, так и их заменители являются сильными парниковыми газами. Озон также относится к парниковым газам. Вклад фреонов в глобальное потепление (через радиационный эффект) составляет весьма заметную величину - 0,36 Вт/м² или около 10% в относительном выражении (рис. 4а). На рисунке оранжевая линия показывает реальную величину радиационного эффекта ОРВ с учетом выполнения Монреальского протокола (1987 г.), а фиолетовая линия соответствует использованию ОРВ без ограничений. Для сравнения показан вклад антропогенных выбросов CO_2 . Видно, что без ограничений вклад ОРВ сегодня был бы близок к вкладу CO_2 (всего в 2 раза меньше). Если эти данные перевести в значения температуры, то вывод формулируется так: снижение выбросов ОРВ благодаря соблюдению Монреальского протокола позволяет избежать глобального потепления примерно на 0,5 – 1°C к 2050 г. по сравнению с экстремальным сценарием с неконтролируемым увеличением ОРВ на 3 - 3,5% в год.

В 2016 году была принята поправка Кигали к Монреальскому протоколу, которая впервые касалась вопросов изменения климата, а именно, ограничений по использованию фреонов, которые не являются озоноразрушающими, но обладают ненулевым потенциалом глобального потепления (ПГП). Результат демонстрируется на рис. 4б. Соблюдение поправки Кигали, которая требует поэтапного сокращения производства и потребления некоторых гидрофторуглеродов (ГФУ - альтернативы ОРВ) в климатических целях, по оценкам, позволит избежать потепления на 0,3 – 0,5°C к 2100 году.

Обнаружен обратный эффект – основные парниковые газы (CO_2 , CH_4 , N_2O) сильно влияют на содержание озона в стратосфере. Модельные расчеты с ис-

пользованием сценария эмиссии парниковых газов RCP6.0 показывают, что рост концентрации CO_2 и CH_4 приводит к увеличению содержания общего озона, а рост концентрации N_2O , наоборот, снижает количество озона. Таким образом, восстановление озона зависит от выбросов парниковых газов. Согласно этим расчетам, общее содержание озона в мире превысит значение 1960 года к концу столетия. Когда общее содержание озона в мире превышает значение 1960 года, что может произойти после резкого снижения выбросов ОРВ, такое состояние называется сверхвосстановлением озонового слоя. Расчеты содержания общего озона в зависимости от сценариев эмиссии парниковых газов показали неожиданный результат (Ozone Depletion, 2022): много выбросов CO_2 – общий озон быстро восстановится (в 2030 г.); мало выбросов CO_2 – общий озон вообще не восстановится даже к 2100 г. В этом – проблема принятия решений по климату.

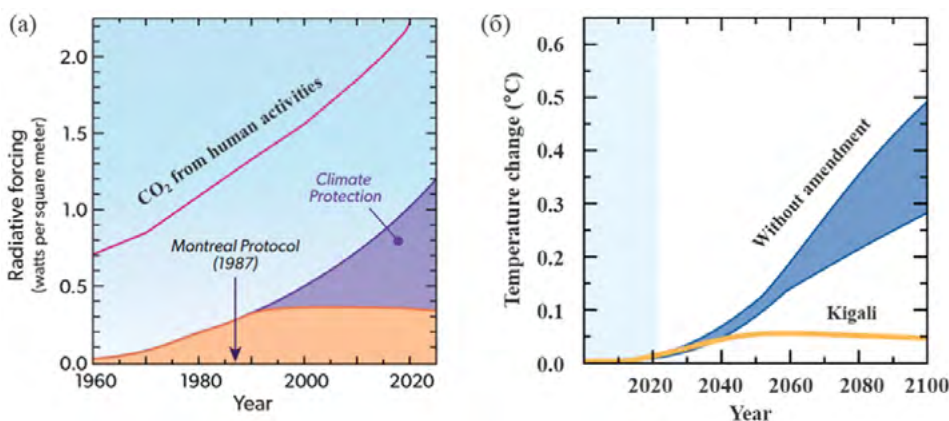


Рис. 4. Взаимные связи между изменением климата и разрушением озонового слоя Земли. (а) Вклад в радиационное воздействие на климат: красная линия – антропогенные выбросы CO_2 ; фиолетовая линия – выбросы ОРВ без ограничений; оранжевая линия – выбросы ОРВ с учетом ограничений Монреальского протокола. (б) Оценочный вклад гидрофторуглеродов (альтернативы ОРВ) в рост температуры поверхности Земли: синяя область – без ограничений на использование ГФУ; желтая линия – при учете поправки Кигали на ограничения использования ГФУ

Роль энергетики и ее развитие в условиях глобальных изменений

Отчетливо продемонстрировано, что преобладающий вклад в глобальное потепление вносит энергетика на органическом топливе, поскольку энергетический сектор дает 3/4 выбросов парниковых газов. В 2015 г. подписано Парижское Соглашение, конечная цель которого - не допустить повышения температуры на 2°C до конца XXI столетия. При выполнении требований Парижского соглашения структура мировой энергетики в ближайшие десятилетия должна претерпеть радикальные изменения в результате отказа от угля, а затем и газа, в качестве топлива и переходу к ВИЭ – возобновляемым источникам энергии. По сценарию Международного Энергетического Агентства (МЭА) к 2050 году 90% электро-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

энергии будет производиться из ВИЭ, в том числе 70% - за счет ветра и солнца, что выглядит нереальным. Во избежание быстрого изменения температуры Земли многие страны взяли повышенные обязательства по углеродной нейтральности – достичь ее уже к 2050 г. На COP28 (саммит по климату в ОАЭ, 30 ноября - 12 декабря 2023 года) решено утроить мощности возобновляемых источников энергии к 2030 году (до 11 000 ГВт) и удвоить глобальные темпы повышения энергоэффективности. В России Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 утверждена «Климатическая доктрина Российской Федерации». Тем самым «проблема глобального изменения климата признается одним из приоритетов внутренней и внешней политики Российской Федерации», а также «определяются дополнительные меры по декарбонизации, позволяющие достичь не позднее 2060 года баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением». Хотя это тоже кажется мало достижимым. В число мер по декарбонизации входят: а) повышение энергетической эффективности во всех отраслях экономики; б) развитие использования возобновляемых и альтернативных источников энергии с низким уровнем выбросов парниковых газов; в) осуществление климатических проектов, в том числе в области лесного хозяйства, направленных на сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения, повышение качества поглотителей и накопителей парниковых газов. Значительный вклад энергетика вносит и в разрушение озонового слоя, так как озоноразрушающими веществами являются преимущественно хлорсодержащие фреоны, которые относятся к основным рабочим телам таких энергетических установок, как тепловые насосы, холодильные машины, кондиционеры и другие. Все вышесказанное означает, что необходимо принимать радикальные решения по развитию мировой энергетики.



Рис. 5. Направления снижения выбросов парниковых газов в энергетике

Поскольку основной причиной глобального потепления считаются антропогенные выбросы парниковых газов, прежде всего CO_2 в энергетическом секторе, то вначале рассмотрим меры по декарбонизации энергетики, а также в целом всей экономики. Направления снижения выбросов парниковых газов в энерге-

тике показаны на рис. 5. К основным направлениям относятся так называемая теплоэнергетика без CO_2 , возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и атомная энергетика. Остальные подходы являются вторичными: энергосбережение (потенциал РФ составляет внушительную цифру - 40%); водородная энергетика (определяется первичными источниками энергии); электротранспорт (определяется производством электричества от других видов энергии); мероприятия в отраслях, особенно, добывающих.

Несмотря на предостережения о скорой истощаемости органического топлива (40 – 60 лет для нефти и газа, 200 – 400 лет для угля) нет сомнений, что на многие десятки лет для ресурсообеспеченных государств органическое топливо будет оставаться приоритетным видом среди энергоносителей. В таком случае, с учетом экологических ограничений упор должен быть сделан именно на развитие экологически чистых и эффективных технологий переработки органического топлива. Теплоэнергетика без CO_2 включает в себя два подхода. Общепринятый подход заключается в повышении энергоэффективности - чем выше КПД, тем меньше потребляется органического топлива и тем меньше выбросы CO_2 . Основное решение в теплоэнергетике на природном газе связано с применением парогазовых установок ПГУ (сочетание паротурбинной установки и газотурбинной установки) с максимально возможным КПД в теплоэнергетике: 50 - 60%. КПД лучшей ПГУ в Германии составляет 61%. Для сравнения - паротурбинные установки на природном газе имеют КПД = 33 - 45%. Задача – широкомасштабное применение ПГУ в энергетике, особенно, Российской. В угольной энергетике основная идея состоит в том, чтобы повысить термический КПД паротурбинного цикла за счет увеличения температуры и давления пара вплоть до значений 600 - 700°C и 35 МПа, соответственно. Такие параметры считаются суперсверхкритическими. КПД может достигать 47 - 55% в сравнении с 35 - 36% для типичных ТЭС. Лучший угольный котел в Германии имеет КПД = 47,5%. В России таких котлов нет. Основная проблема связана с материалами, которые могут выдерживать столь тяжелые (экстремальные) условия эксплуатации.

Радикальным подходом является применение технологий с секвестированием CO_2 . В числе наиболее перспективных – цикл Аллама (Allam et al., 2013). Он заключается в сжигании природного газа в кислороде и использовании углекислого газа в сверхкритическом состоянии как рабочего тела вместо воды (рис. 6). За счет высоких параметров рабочего тела (температура газа 1150°C, давление 300 атмосфер) достигается КПД до 59%, полностью извлекается углекислый газ без выброса в атмосферу, а нормированная себестоимость по оценке составит 5 – 6 центов/кВт·ч, то есть на уровне самых дешевых энергетических технологий. В Хьюстоне запущен пилотный стенд мощностью 50 МВт (т), компанией Тошиба создана турбина на сверхкритическом CO_2 , разработан проект коммерческой ТЭС мощностью 300 МВт (э) и начата первая его реализация. Заметим, если потребовать секвестирование CO_2 для ПГУ, то их КПД упадет примерно на 10 процентных пунктов, то есть до 40 - 50% вместо 50 - 60%.

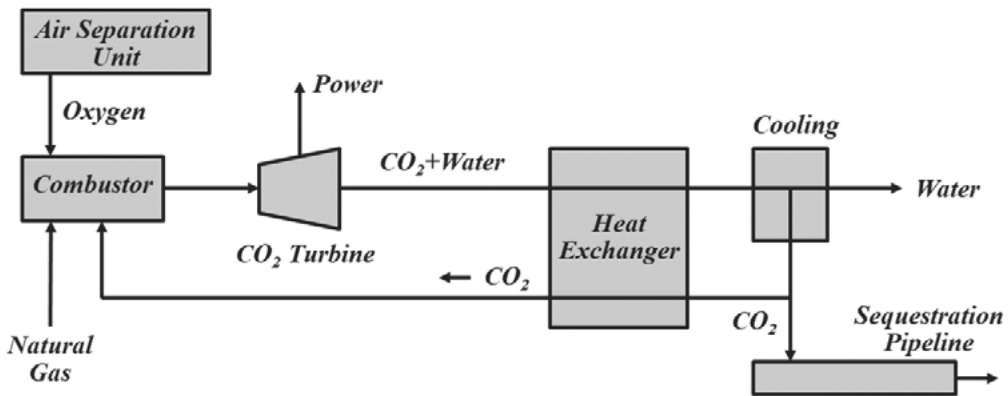


Рис. 6. Схема цикла Аллама

Генеральное направление в угольной теплоэнергетике связано с глубокой переработкой угля, прежде всего, газификацией - неполным сжиганием угля и сопутствующим получением синтез-газа (смесь водорода и CO), который потом можно эффективно сжигать или использовать в химической технологии, в частности, извлекать водород для водородной энергетики. Существует (и довольно много лет) множество способов газификации, но они пока не получили широкого распространения, не выдерживая конкуренции с традиционными энергетическими технологиями. Установленная мощность всех типов установок (не только энергетического назначения) с газификацией угля в мире составила 147 ГВт в 2015 г., что весьма незначительно. Включение цикла Аллама в общий термодинамический цикл на угле дает новое качество. Для этого сначала надо получить синтез-газ в процессе газификации угля (допускаются разные способы газификации), а затем использовать синтез-газ в цикле Аллама с итоговым КПД порядка 51%. То есть, реализуется цикл Аллама на угле с полным секвестированием углекислого газа. Таким образом полностью решается проблема удовлетворения требований Парижского соглашения – использование энергетических технологий без выбросов CO₂.

Вне всяких сомнений будущая энергетика будет базироваться на источниках с максимально высокой концентрацией энергии. И здесь вне конкуренции ядерная энергетика. Ввиду ряда аварий на АЭС современное состояние ядерной энергетики в мире можно оценить как нестабильное. Прогноз вклада АЭС в энергетику весьма неопределенный: 6 – 13,5% к 2050 г. Доля АЭС в мировом производстве электроэнергии за последнее время снизилась с 17,5% в 1996 г. до 9,2% в 2022 г. (в России – 20%, а во Франции – 69%). В атомной энергетике используется преимущественно изотоп урана U235 (в реакторах на тепловых нейтронах), но его очень мало. В то время как запасов U238 при использовании в быстрых реакторах хватит на 1 000 лет при нынешнем мировом энергопотреблении. Пока в мире эксплуатируются только два быстрых реактора с

натриевым теплоносителем - БН600 и БН800, расположенных в России, но это будущее ядерной энергетики. Новое прорывное направление в ядерной энергетике прописано в российском проекте «Прорыв». Предусмотрено сооружение опытно-демонстрационного энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 (реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем) мощностью 300 МВт (э), технологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), новых видов топлива и материалов, а в последующем – проектирование и сооружение коммерческого энергоблока с быстрыми реакторами мощностью 1 200 МВт (э). Старт проекта был дан в сентябре 2021 г., г. Томск. Термоядерный синтез в планах на 21 век не рассматривается.

В соответствии с положениями Парижского соглашения преобладающим видом энергии в будущем должны быть возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Из-за периодичности действия большинства ВИЭ требуется дополнительно разработка эффективных методов преобразования и хранения энергии, что приводит к существенному удорожанию производимой электроэнергии. К ВИЭ относятся: солнце; ветер; биомасса, включая органические отходы; гидроресурсы (малые водостоки); геотермальные ресурсы (тепло приповерхностных нагретых вод и тепло сухих пород на больших глубинах). Кроме перечисленных выше основных видов к ВИЭ относятся также: энергия волн; энергия приливов; термоградиенты в океане; градиенты солености; тепло грунта и незамерзающих водоемов и др. Энергия крупных рек тоже является возобновляемым источником энергии, но выделена в самостоятельное направление. Как отмечено выше, по сценарию МЭА к 2050 году почти 90% производства электроэнергии будет производиться из возобновляемых источников, при этом на долю ветра и солнечной энергии вместе приходится почти 70%. Для России такой подход неприемлем, поскольку условия для реализации этих типов ВИЭ неподходящие. Но главная причина - в России (самой холодной стране мира) огромная доля энергии потребляется в виде тепла для обогрева (175 ГВт из 450 ГВт в мире, то есть почти 40%!). Невозможно столько тепла производить из ВИЭ. В этом плане среди наиболее перспективных видов ВИЭ выделяется геотермальная энергия (Алексеев, 2022), точнее ее составляющая в виде петротермальной энергии, то есть тепла сухих пород Земли на глубинах от 3 до 10 км (технически извлекаемое тепло) с температурой до 350°C. Это наиболее экологически чистый источник энергии из всех остальных видов, и он предусматривает изначально извлечение тепловой энергии, решая тем самым проблемы теплоснабжения. Можно утверждать, что петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией (с учетом конечных сроков существования развитых цивилизаций)! Однако при извлечении тепла сухих пород с больших глубин необходимо преодолеть ряд принципиальных технических проблем, среди которых: высокая цена бурения, трудность создания проницаемого резервуара между скважинами или образования замкнутых контуров (см. рис. 7).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

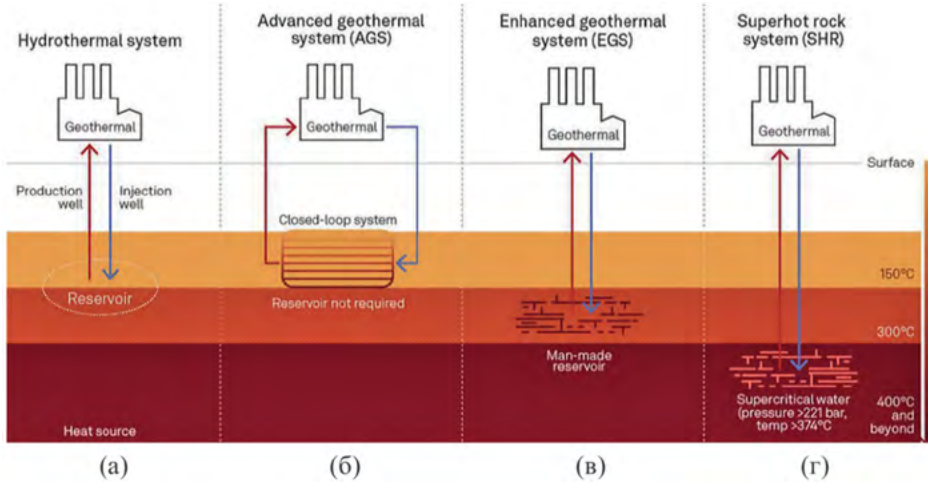


Рис. 7. Способы извлечения тепла из геотермальных источников с целью генерации электроэнергии. (а) – при наличии под землей пара или пароводяной смеси; (б), (в), (г) – в горячих сухих породах. В последних трех случаях между скважинами надо создавать проницаемый резервуар (в – г) или соединять их между собой горизонтальными каналами (б), тем самым образуя замкнутый циркуляционный контур, по которому движется теплоноситель, нагреваясь от горячих сухих пород

При невысоких температурах геотермальной воды (порядка или даже менее 100°C) необходимо применять дорогостоящие бинарные схемы преимущественно на основе органического цикла Ренкина с неводным теплоносителем, например, фреоном. А фреоны являются причиной разрушения озонового слоя Земли и существенно влияют на изменение климата. Но перспективы открываются грандиозные. Показателен пример США, где к 2050 г. установленная электрическая мощность петротермальных источников будет составлять 90 ГВт (более трети установленной мощности России), тепловая мощность достигнет 320 ГВт (в России тепловое потребление равно 175 ГВт), наконец, количество тепловых насосов, насчитывающих сегодня 2 млн экземпляров, достигнет 28 млн штук. А тепловые насосы позволяют экономить до 50% топлива на обогрев.

При выборе источников энергии с целью низкоуглеродной электрогенерации можно пользоваться табл. 1, где приведены выбросы парниковых газов в относительной форме – на единицу произведенной энергии. Видно, что при переходе от угля на газ выбросы CO_2 снижаются на 40%. ВИЭ также вносят вклад в эмиссию парниковых газов, хоть и небольшой. А резюме на перспективу следует из здравых оценок MIT (Morris et al., 2021): при оптимальном развитии энергетических технологий органическое топливо может без особых ограничений использоваться вплоть до 2100 г. с вкладом в электрогенерацию до 39% (сегодня около 60%), но при условии секвестрирования CO_2 . Причем, доля угля будет снижаться до 2040-х годов, но затем, по мере развития технологий с секвестрированием CO_2 (Coal CCS), начнется существенный рост использования угля с максимумом в районе 2075 года. В то время как солнце и ветер дадут вклад лишь 23% (рис. 8).

Табл. 1. Сравнение источников энергии по парниковым выбросам

Источник энергии	Выбросы парниковых газов, т CO ₂ – экв. / ГВт•ч	Относительные выбросы
Уголь	820	1,00
Газ	490	0,60
ФЭУ	48	0,06
АЭС	12	0,015
ВЭС	11	0,013

Теперь о фреонах. Поскольку практически все основные рабочие тела типа фреонов в тепловых машинах являются либо озоноразрушающими, либо парниковыми (или то и другое), то существует принципиальная проблема выбора рабочих веществ для холодильной техники, тепловых насосов, органического цикла Ренкина (Abas et al., 2018). По этой причине, на переходный период рассматриваются такие озонобезопасные фреоны (но обладающие парниковым эффектом) как R134a, R245fa, а в будущем – фреоны нового поколения без парникового эффекта, пока чересчур дорогие. Наиболее подходящими рабочими телами (неводного типа) с точки зрения озонобезопасности и парникового эффекта являются давно известные природные агенты: углеводороды типа пропана и изобутана; углекислый газ; аммиак. У каждого свои особенности, в частности, токсичность и горючесть. Аммиак выглядит особо перспективным, поскольку освоен в глобальных масштабах, кроме того, это лучший способ хранения водорода, и он является эффективным топливом для топливных элементов.

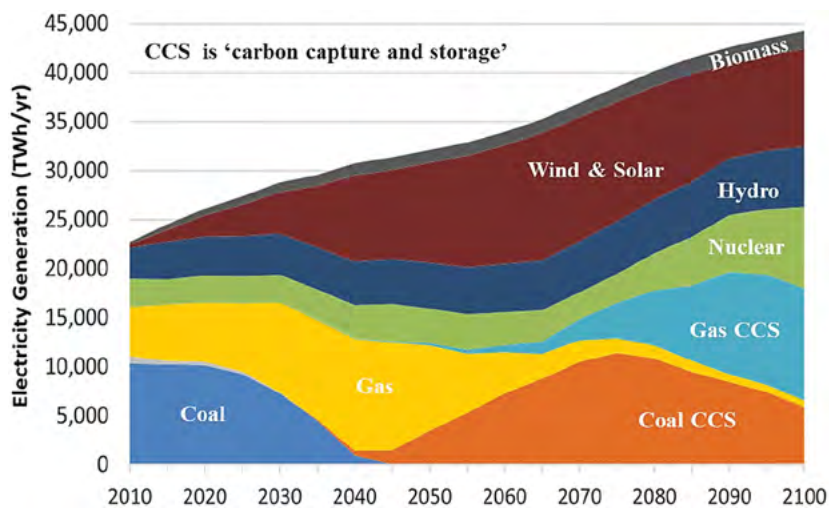


Рис. 8. Наиболее оптимистический сценарий развития энергетики по модели MIT (Morris et al., 2021)

Выводы

Убедительно показано, что преобладающий вклад в глобальное потепление вносит энергетика на органическом топливе. В связи с этим необходимо последовательно осуществлять декарбонизацию энергетики и в целом экономики, но со скоростями, не превосходящими экономические возможности страны.

В сфере энергетики на органичном топливе необходимо, прежде всего, повышать эффективность производства энергии. Радикальным подходом является применение технологий с секвестированием CO_2 . В числе наиболее перспективных – цикл Аллама, предусматривающий сжигание топлива в кислороде без выбросов оксида углерода в атмосферу и использование сверхкритического CO_2 в качестве рабочего тела.

Альтернативными безуглеродными технологиями являются атомная энергетика и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В числе наиболее перспективных ВИЭ видится геотермальная энергетика с переходом в будущем на глубинное (петротермальное) тепло. Петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией!

Значительный вклад энергетика вносит в разрушение озонового слоя. Поскольку практически все основные рабочие тела (типа фреонов) в тепловых машинах являются либо озоноразрушающими, либо парниковыми (или то и другое), то существует принципиальная проблема выбора рабочих веществ.

Наиболее подходящими рабочими телами (неводного типа) с точки зрения озонобезопасности и парникового эффекта являются давно известные природные агенты: углеводороды типа пропана и изобутана; углекислый газ; аммиак. Аммиак выглядит особо перспективным, поскольку освоен в глобальных масштабах, кроме того, он представляет собой соединение, которое можно считать одним из лучших способов хранения водорода.

Литература

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.
2. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник Российской академии наук, 2022, Т. 92, № 1. С. 3-14. DOI 10.31857/S0869587322010066.
3. Friedlingstein P. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison // J. Climate, 2006, vol. 19, No. 12. Pp. 3337-3353.
4. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO_2 : основные процессы и взаимодействие с климатом // Фундаментальная и прикладная климатология, 2017, 4, 9-31. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-9-31.
5. Muryshv K., Eliseev A., Mokhov I., Arzhanov M., Timazhev A., Denisov S. Time lag between changes in global temperature and atmospheric CO_2 content

according to the results of numerical experiments with Earth system models// Proc. of SPIE, 2019, Vol. 11208, 112087U1 -112087U10. DOI: 10.1117/12.2540793.

6. Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A. V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environ. Res. Lett., 2021, 16, 105004. 11 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c8a>.

7. Budyko M.I. The effect of solar radiation variations on the climate of the earth // Tellus, 1969, 21, 611-619.

8. Lucarini V. Global stability properties of the climate: melancholia states, invariant measures, and phase transitions // abstr. 25th Int. Congress Theor. Appl. Mech. Milano, August 22-27, 2021, p. 169.

9. Ozone Depletion: Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2022 // World Meteorological Organization. Ozone Research and Monitoring – GAW Report No. 278. 520 p.

10. McLinden M.O. and Huber M.L. (R)Evolution of Refrigerants // J. Chem. Eng. Data, 2020, 65, 4176–4193. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jced.0c00338>.

11. Allam R.J. et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide // Energy Procedia, 2013, vol. 37, pp. 1135–1149. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731.

12. Алексеенко С.В. Геотермальная энергия // В книге «10 прорывных идей в энергетике на ближайшие 10 лет», Международная Ассоциация «Глобальная энергия», 2022, с. 147 – 167.

13. Morris J., Kheshgi H., Paltsev S., Herzog H. // Climate Change Economics, 2021, Vol. 12, No. 1, 2150001, 29 p.

Abas N., Kalair A., Khan N., Haider A., Saleem Z., Saleem M. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90, 557–569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.099>.

ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИИ ПО ДОСТИЖЕНИЮ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ

В.В. Клименко^{1, 2, 3*}, А.В. Клименко², А.Г. Терешин^{1, 2}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

³Институт энергетических исследований РАН

*nilgpe@mpei.ru

Аннотация. Исследованы перспективы снижения углеродоемкости экономики России и возможности достижения климатической нейтральности народного хозяйства страны к 2060 г. На основе историко-экстраполяционного подхода к исследованию развития различных социотехнических систем и путем сравнения с динамикой углеродных показателей экономик ведущих стран мира показано, что полная компенсация антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ) поглощением биосферой (в первую очередь, лесами) сегодня возможна скорее лишь теоретически. Условием этого является выполнение чрезвычайно амбициозных масштабных программ реформирования всех отраслей экономики страны – от энергетики до лесного хозяйства. Так, в оптимистическом сценарии темпы снижения удельных показателей эмиссии ПГ на душу населения должны составлять максимальные достигнутые в мире за последние 50 лет значения в 1% в год, а управление лесами включать полную компенсацию растущих вырубок и 50%-ное сокращение потерь лесов от пожаров, в настоящее время являющихся вторым (после энергетики) источником выбросов ПГ в атмосферу. Наиболее вероятным представляется сценарий со скоростью снижения удельных выбросов ПГ на душу населения в 0,5%/год, и умеренным возрастанием поглощающей способности лесов в основном за счет реализации лесоклиматических проектов и снижения пожарной эмиссии. При реализации последнего сценария нетто-эмиссия ПГ может составить примерно 700 Мт CO₂^{экв} к 2060 г., что потребует для достижения климатической нейтральности создания национальной индустрии улавливания и захоронения углерода беспрецедентных масштабов.

Ключевые слова: Россия, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, историко-экстраполяционный подход

Несмотря на развивающуюся тенденцию к фрагментации мировой экономики, потерю авторитета различных международных организаций и эрозию заключенных ранее соглашений, идея предотвращения катастрофических изменений климата, впервые закрепленная в РКИК ООН в 1992 г., сохраняет свою актуальность и поддержку со стороны всех стран мира.

С тех пор, как в Рио-де-Жанейро в 1992 г. была подписана Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК), практически ежегодно страны-участницы собираются на конференции для обсуждения хода выполнения Конвенции и формирования новых инструментов защиты климата. Можно отметить нарастание решительности предпринимаемых мировым сообществом мер по противодействию опасным изменениям климата, которая обусловлена сохраняющимися тенденциями глобального потепления, более глубоким пониманием существа и опасности происходящих процессов, а также медленными темпами декарбонизации мировой экономики.

Вопросы эффективности предлагаемых мер по предотвращению неприемлемого изменения климата (а таким считается повышение среднеглобальной температуры выше 2°C по сравнению с доиндустриальным периодом) постоянно находятся в центре внимания научного сообщества. В частности, в [1-5] было показано, что мероприятия ни Киотского протокола (1997 г.), ни Парижского соглашения (2015 г.) даже при полном их осуществлении не в состоянии удержать глобальное потепление в пределах 2°C , и лишь полное выполнение решений Пакта Глазго (2021) способно предотвратить повышение среднеглобальной температуры выше $1,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 1).

В частности, заявленное в Глазго снижение выбросов метана (этот газ обладает потенциалом глобального потепления на вековом временном горизонте, в 25 раз превышающим показатель диоксида углерода, а также весьма небольшим периодом жизни в атмосфере в 9,1 года [6]), способно уменьшить повышение среднеглобальной температуры к 2100 г. на $0,3^{\circ}\text{C}$ по сравнению с базовым «Парижским» сценарием, что почти в два раза превышает эффект лесоклиматических мероприятий (рис. 1).

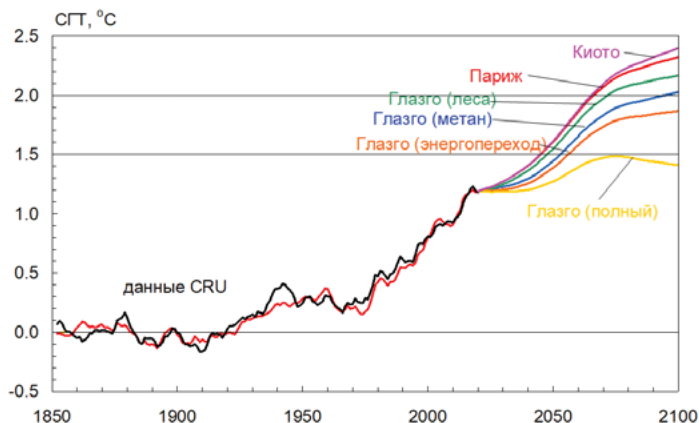


Рис. 1. Изменения среднеглобальной температуры (в отклонениях от среднего значения за 1850-1900 гг.): модельные оценки по различным сценариям [1-5] и данные инструментальных измерений CRU (пятилетние скользящие средние)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Россия, в последние годы последовательно сокращая свое участие в различных межгосударственных программах, тем не менее, декларирует приверженность стремлению к декарбонизации своей экономики. В принятой в октябре 2021 г. Стратегии низкоуглеродного развития (СНУР) [7] поставлена цель достичь к 2060 г. углеродной нейтральности национальной экономики. В соответствии со Стратегией движение к углеродной нейтральности планируется по сути осуществлять лишь после 2030 г. (рис. 2). Главная роль в этом движении отводится не мероприятиям в энергетической сфере, что было бы разумно предполагать, а более чем двукратному возрастанию фиксации углерода лесами страны в сфере землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ). Такая ставка, по мнению ряда специалистов в области лесного хозяйства [8, 9], покоится на довольно шатком фундаменте и потому является весьма рискованной.

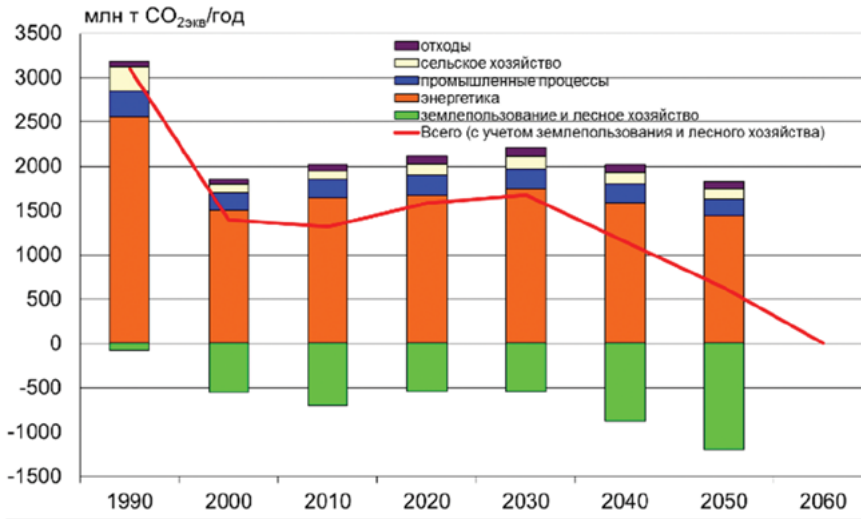


Рис. 2. Целевой сценарий СНУР [7]

Подготовка СНУР и ее презентация на конференции сторон РКИК в Глазго (2021 г.) вызвала целый поток публикаций, исследующих различные аспекты декарбонизации отечественной экономики [8–18]. Настоящая работа призвана оценить реальность достижения поставленной цели с точки зрения мирового исторического опыта и определить возможные пути решения данной задачи.

Динамика выбросов ПГ и карбоноёмкости экономики в России в 1990–2020 гг.

За последние три десятилетия в динамике выбросов ПГ в России выделяются два периода – резкое снижение в 1990-е годы и постепенный рост в 2000–2020 гг. (рис. 2). Минимум нетто-эмиссии (с учетом поглощения CO_2 биотой) пришелся

на 2010 г., что было вызвано увеличением поглощающей способности лесов за счет сокращения заготовок древесины и зарастания брошенных сельхозугодий на фоне умеренного увеличения промышленных выбросов ПГ.

Если падение выбросов в 1990-2000 гг. затронуло практически пропорционально все отрасли национальной экономики и отразилось на выбросах всех ПГ (диоксид углерода, метан, закись азота, хлорфторуглероды и др.), то последовавшее затем частичное восстановление объемов эмиссии пришлось в основном на энергетику и в меньшей степени – на промышленные процессы, где выросли выбросы углекислого газа (рис. 2). Основными причинами этих изменений стала глубокая перестройка экономики страны (рис. 3-4).

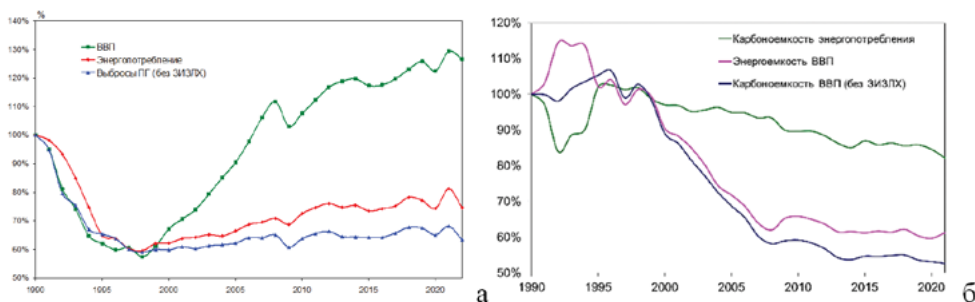


Рис. 3. Энергопотребление, физический объем ВВП и выбросы ПГ (в пересчете на $CO_{2экв}$) относительно уровня 1990 г. (а) и энергоёмкость и карбоноёмкость ВВП и карбоноёмкость энергопотребления (б) России по данным Росстат и [19]

Резкое падение объема валового внутреннего продукта (ВВП) в 1990-е годы сопровождалось и структурной перестройкой экономики, а именно – снижением доли промышленного производства и ростом услуг (рис. 4а), причем этот процесс продолжался вплоть до экономического кризиса 2008 г., что привело к существенному снижению энергоёмкости ВВП (рис. 3а).

Эти же экономические драйверы обеспечили в 1990-2010 гг. практически двукратное снижение карбоноёмкости экономики России (рис. 3б), чему способствовали также переход на менее углеродоемкий природный газ и новый импульс в строительстве и вводе АЭС в отечественной энергетике (рис. 4б).

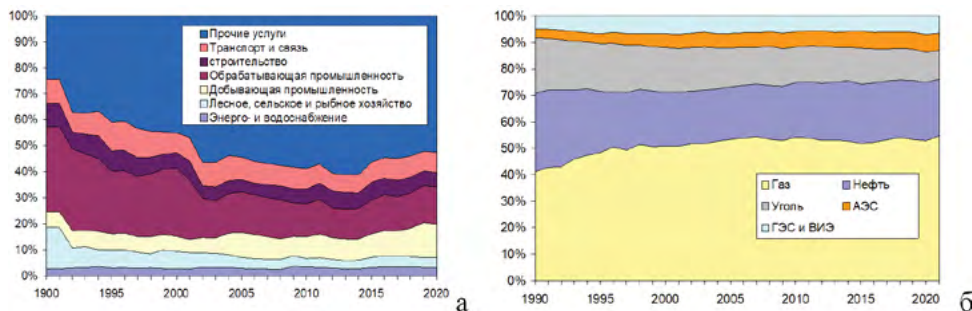


Рис. 4. Структура ВВП (а) и энергопотребления (б) в РФ (Росстат и [19])

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Однако наметившаяся с 2014 г. тенденция к опережающему развитию добывающей и обрабатывающей промышленности (рис. 4а) вместе с замедлением темпов газификации (рис. 4б) отечественной экономики привели практически к стагнации энергоемкости ВВП России и, соответственно, к прекращению снижения карбоноёмкости энергопотребления (рис. 3б).

Уникальной особенностью России, оказывающей значительное влияние на углеродный баланс не только самой страны, но и планеты в целом, являются масштабные лесные пожары (рис. 5). Эта особенность приобрела в последние десятилетия характер национального бедствия и потребовала вмешательства Президента страны [20], в императивной форме потребовавшего 50% сокращения объема выгораний к 2030 г. относительно уровня 2021 г. (заметим, рекордного за всю историю наиболее полных спутниковых наблюдений). Пока же данные дистанционного зондирования Земли (как отечественные [21-22] и Авиалесоохраны, так и зарубежные базы данных *GFED*, *Global Forest Watch*), свидетельствуют о росте лесных площадей, пройденных огнем и увеличении соответствующей эмиссии CO_2 , которая составляет в среднем около 40% от выбросов при сжигании топлива, но в отдельные годы достигая 75%. Увеличение площади лесных пожаров со временем обусловлено, помимо антропогенных факторов, таких как развал лесоохраны в 1990-х гг., потеплением климата, которое на территории России почти повсеместно приводит к увеличению горимости древостоя и продолжительности пожароопасного периода на срок до 1-3 недель в течение текущего столетия. Различные модельные [23] и статистические [24] оценки показывают, что к концу столетия площадь лесных пожаров может возрасти более чем в 1,5 раза даже при реализации умеренных сценариев потепления. Эти обстоятельства является дополнительным серьезным препятствием на пути осуществления планов по увеличению фиксации углерода лесами.

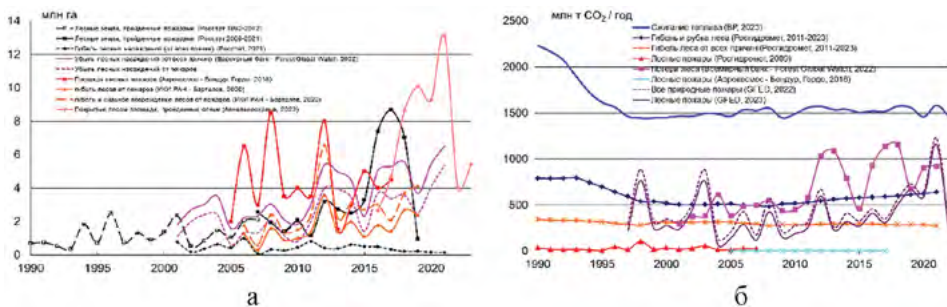


Рис. 5. Площадь лесов, пройденная огнем и гибель лесов от пожаров (а) и выбросы углекислого газа от потерь лесов в сравнении с эмиссией при сжигании топлива (б) в России ([19, 21-22], *Авиалесоохрана*, *GFED* и *Global Forest Watch*)

Как было показано в [5], вслед за снижением выбросов углекислого газа при сжигании ископаемого топлива наиболее эффективным инструментом уменьшения глобального парникового эффекта должны стать мероприятия по сокращению выбросов метана и увеличению площади лесов.

К сожалению, в отличие от эмиссии углерода при сжигании топлива расчеты выбросов метана представляют значительно более сложную задачу и не отличаются необходимой точностью. Как видно из рис. 6а, показывающего динамику выбросов CH_4 на территории страны за последние 50 лет, эти оценки могут различаться в несколько раз.

Инвентаризация метановых выбросов, проводившаяся в 1994-2021 гг. Росгидрометом, претерпела два существенных изменения: смена методики расчетов в 2011 г. привела к увеличению оценок примерно в 1,5 раза, а модификация 2017 г. – к их снижению почти в два раза, причем основные изменения коснулись энергетических источников – шахтного метана и утечек из газопроводов (рис. 6б).

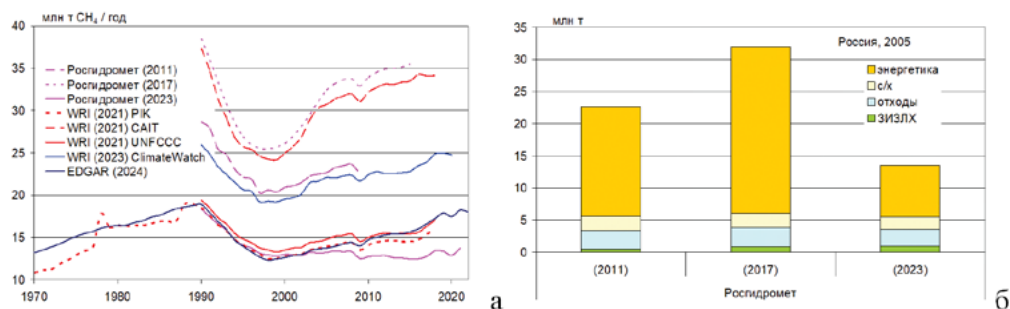


Рис. 6. Суммарные выбросы метана на территории России в 1970-2022 гг. (а) и их структура в 2005 г. (б) по оценкам [19, 25-26], EDGAR и WRI

Выбросы метана в настоящее время можно оценить в 15-35 млн. т ежегодно (в зависимости от используемой методики), т.е. примерно в 20-50 млрд. m^3 , что составляет 5-12 % от ежегодного потребления природного газа экономикой России и вполне соответствует среднемировому показателю в 9%. В мире разработаны и успешно применяются различные технологии улавливания и утилизации шахтного и свалочного метана, а также производства биогаза из сельскохозяйственных отходов [17]. К сожалению, в России пока реализованы единичные проекты в этой области. Модернизация газотранспортной системы, использование технологий улавливания и утилизации шахтного метана и свалочного газа способны не только дать заметную экономию топлива, но и обеспечить существенный «климатический» эффект, поскольку парниковый эффект, вызываемый метаном, в 25 раз выше, чем у диоксида углерода [6].

Международные сравнения

Для оценки возможностей достижения углеродной нейтральности выполнен сравнительный анализ процессов, происходящих в экономике и, прежде всего, в энергетике ряда стран – как лидеров декарбонизации (ЕС, Япония, США и Канада), так и крупнейших развивающихся экономик, находящихся только в начале пути к заявленной ими углеродной нейтральности (Китай, Индия, Турция).

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

В сфере энергетики для стран-лидеров характерна смена периода стабилизации удельного (на душу населения) энергопотребления его умеренным снижением (рис. 7а), в то время как в развивающихся экономиках (куда входит и Россия) продолжается рост этого показателя.

При анализе карбоноёмкости энергопотребления (рис. 7б) такого же явного разделения не наблюдается. У большинства стран (ЕС, США, Япония, Китай, Турция) на протяжении последних 50 лет сохраняется тенденция снижения удельных выбросов в энергетике (с трехлетней паузой в Японии, связанной с массовой остановкой АЭС после аварии на Фукусиме в 2011 г.), в Канаде они стабилизировались еще в 1985 г. на беспрецедентно низком уровне в результате широкого использования гидро- и атомной энергии. В России с 2008 г. наблюдается стагнация этого показателя на уровне едва ниже среднемирового, а энергетика Индии на всем 50-летнем интервале отличается удивительным постоянством в результате устойчивого преобладания угля в национальном энергетическом балансе.

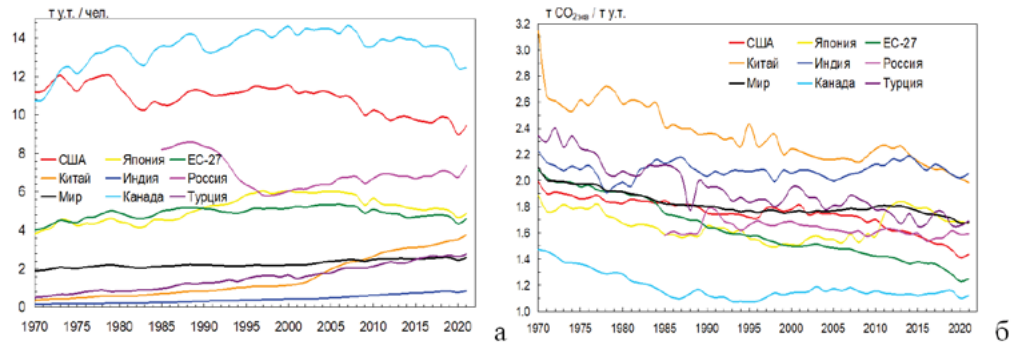


Рис. 7. Удельное энергопотребление (а) и углеродная интенсивность энергопотребления (б) по данным [26-28] и *EDGAR*

Все исследуемые страны за последние 40 лет значительно сократили энергоёмкость своих экономик (рис. 8а), причем если в 1980 г. различие между довольно неожиданным лидером Турцией и понятным аутсайдером Китаем составляло один порядок, то в настоящее время границы диапазона различаются всего в 3 раза, причем максимальные значения зафиксированы в странах с наиболее холодным климатом – России и Канаде ввиду значительных дополнительных затрат на отопление.

Сочетание этих двух тенденций – снижения углеродоемкости энергопотребления и энергоёмкости ВВП ожидаемо привели к существенному уменьшению углеродоемкости экономик всех рассмотренных стран (рис. 8б), но с разными темпами (см. табл. 1).

Характер изменений удельных выбросов ПГ на душу населения (рис. 9а), как и следовало ожидать, в точности соответствует динамике душевого потребления энергии, основного источника ПГ.

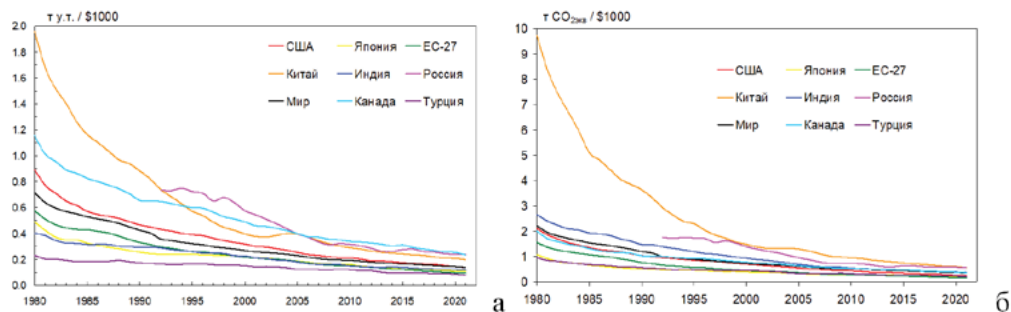


Рис. 8. Энергоемкость (а) и углеродоемкость (без ЗИЗЛХ) (б) ВВП по ППС по данным *EDGAR* и МВФ

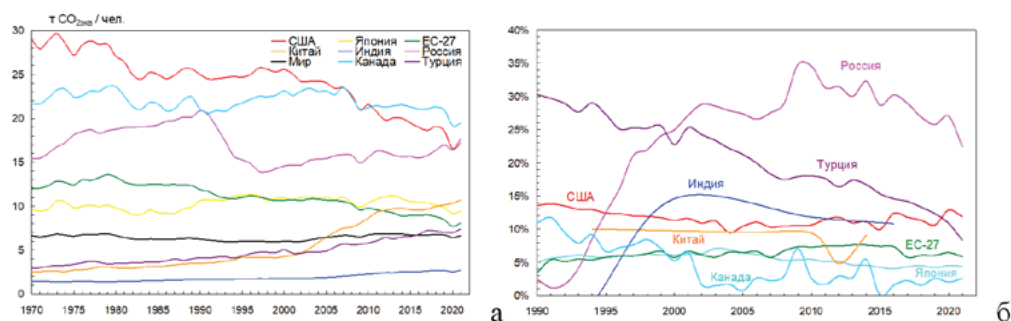


Рис. 9. Удельные выбросы ПГ на душу населения (без ЗИЗЛХ) по данным [28] и *EDGAR* (а) и нетто-сток ПГ за счет ЗИЗЛХ (относительно суммарной эмиссии из остальных источников) по данным РКИК (б)

Климатическая нейтральность достигается в том случае, когда антропогенная эмиссия ПГ уравнивается биосферными стоками, поэтому таким важным является соотношение этих величин. Среди больших стран Россия по этому параметру сегодня является безусловным лидером (рис. 9а), поскольку в последнее десятилетие леса поглощали около трети объема выбросов ПГ из антропогенных источников [19]. Важно отметить, что огромное преимущество в этой сфере, которым сейчас располагает Россия, является не постоянным, а временным и может быть утрачено еще до середины нынешнего столетия в результате фундаментальной трансформации национального лесного резервуара углерода. Дело в том, что нынешние исключительно высокие значения биосферного стока, пик которых, кстати, уже давно остался позади, обусловлены кратным сокращением рубок в 1990-х гг. и зарастанием брошенных тогда же сельскохозяйственных земель [9].

Растущий молодой лес активно поглощал углерод атмосферы в течение нескольких десятилетий, но по мере его перехода в категорию возрастных он постепенно утрачивает эту способность вплоть до перехода в стационарную фазу практического равновесия с близким к нулю нетто-поток углерода – примерно так, как это происходит теперь в зрелых управляемых лесах Европы или Канады, согласно данным инвентаризаций РКИК.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Табл. 1. Средние годовые темпы изменения удельных выбросов ПГ (расчеты авторов по данным [28], МВФ и EDGAR)

Период	США	Канада	Япония	ЕС-27	Россия	Турция	Китай	Индия
Углеродоемкость ВВП, т.у.т./\$1000								
1980-2020	-5.0%	-4.0%	-3.9%	-5.3%		-3.5%	-6.7%	-4.6%
1990-2020	-4.3%	-3.5%	-2.8%	-5.0%	-3.8%	-3.2%	-5.8%	-4.3%
2000-2020	-4.5%	-3.9%	-3.0%	-4.9%	-4.4%	-3.6%	-4.3%	-4.2%
2010-2020	-4.7%	-3.6%	-2.8%	-5.5%	-2.8%	-4.1%	-4.3%	-3.2%
Выбросы ПГ на душу населения								
1970-2020	-1.1%	-0.2%	-0.1%	-0.9%	0.1%	1.7%	2.8%	1.1%
1980-2020	-1.2%	-0.5%	-0.2%	-1.4%	-0.3%	1.8%	3.1%	1.5%
1990-2020	-1.3%	-0.6%	-0.4%	-1.6%	-1.4%	1.4%	3.7%	1.5%
2000-2020	-1.9%	-1.4%	-0.8%	-1.8%	0.4%	1.4%	4.5%	1.8%
2010-2020	-2.3%	-1.6%	-1.0%	-2.7%	0.0%	1.3%	1.8%	1.2%

Сценарии выбросов ПГ в России до 2060 г.

События последних двух лет разом перечеркнули все существовавшие ранее прогнозы экономического развития не только России, но и многих других государств. Именно поэтому для целей нашего исследования, когда ставится задача выполнить весьма рискованную экстраполяцию интенсивности осуществления политики по сдерживанию эмиссии ПГ на несколько десятилетий вперед, был избран историко-экстраполяционный метод в противовес традиционному, основанному на детальном предположении о развитии экономики. В том, что историческая экстраполяция способна давать полезные результаты, убеждает наш собственный опыт построения дальних прогнозов развития мировой энергетики, когда выполненные, например, в 1990 г. прогнозы [29] продемонстрировали совпадение с действительными значениями потребления энергии в мире в пределах 2% на горизонте свыше 30 лет [30]. Тем не менее, учитывая необычайно высокую зависимость конечного результата от политических решений, мы сочли необходимым здесь рассмотреть два крайних сценария движения России к климатической нейтральности: оптимистический и реальный, учитывающий, в том числе, и турбулентные текущие события. В качестве демографического сценария в обоих вариантах избран медианный сценарий ООН [28], предполагающий постепенное снижение численности населения страны до 128 млн. к 2060 г. Следует особо отметить, что природные источники ПГ, учет которых необходим в климатических расчетах (особенно метана, естественная эмиссия которого на территории России

в настоящее время достигает 30% от антропогенной [31]), в настоящей работе не рассматриваются, за исключением лесного резервуара углерода.

Оптимистический сценарий основан на предположении, что идеи борьбы за сохранение климата приобретут в российском обществе значительно большее влияние, соизмеримое с тем, которое возобладаало в развитых странах мира в последние три десятилетия. В этом случае Россия может рассчитывать на развитие скоростей декарбонизации на уровне лучших мировых стандартов (см. табл. 1). В целом параметры **оптимистического** сценария декарбонизации выглядят следующим образом:

1) темпы снижения удельных (на душу населения) антропогенных выбросов ПГ составляют 1% в год (что соответствует среднему значению для развитых стран мира в 1990-2020 гг.);

2) показатели лесопользования следуют Лесной стратегии-2030 [32] и предполагают полное лесовосстановление после рубок; динамика поглощения углерода лесами следует высоким национальным оценкам;

3) учтена дополнительная фиксация углерода лесами под влиянием изменения климатических факторов (температуры и количества осадков) [33-34], а также эффекта фертилизации в результате обогащения атмосферы CO_2 [33];

4) реализовано 50%-ное сокращение площади лесных пожаров (согласно Указу Президента России [20]) к 2030 г. с сохранением этого показателя в дальнейшем.

Реальный сценарий декарбонизации учитывает те трудности, которые связаны с радикальной перестройкой всех отраслей экономики – от энергетики до лесопользования, и характеризуется следующими параметрами:

1) темпы снижения удельных выбросов ПГ соответствуют умеренным значениям, достигнутым в 1990-2020 гг. в Японии и Канаде и составляют 0,5% в год, что заметно лучше современных российских показателей;

2) показатели лесопользования следуют актуальным международным рекомендациям и основаны на результатах официальной инвентаризации лесов [10, 19] и Лесной стратегии-2030 [32] с учетом реальных перспектив развития лесного комплекса и динамики поглощающей способности лесной биоты, согласно которым нетто-сток углерода обнаруживает тенденцию к небольшому росту. В этом варианте стареющие леса теряют свою биопродуктивность, но одновременно в лесном хозяйстве реализуются технически и экономически возможные лесоклиматические проекты, а борьба с лесными пожарами имеет ограниченный успех.

Расчеты антропогенных выбросов и биотического нетто-стока ПГ в рамках этих двух сценариев декарбонизации приведены на рис. 10 вместе с оценками других авторов.

Здесь следует особо подчеркнуть, что все имеющиеся сценарии повышения нетто-стока ЗИЗЛХ – суть результаты моделирования, никак не связанные ни с данными Национального кадастра ПГ [19], ни с Лесной стратегии-2030 [32]. Они также противоречат доказанным тенденциям нарастания лесопожарной эмиссии в условиях продолжающегося потепления.

Оптимистический сценарий предполагает немедленный старт мероприятий по декарбонизации экономики России и способен снизить выбросы ПГ с современных 2 млрд. т. $\text{CO}_{2\text{экв}}$ до примерно 1,3 млрд. т. $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г. Последняя величина соответствует рассчитанной по национальной методике и удвоенной по сравнению с современной поглотительной способности лесов страны при условии полной компенсации рубок, двукратного сокращения площадей лесных пожаров и увеличению биопродуктивности лесов.

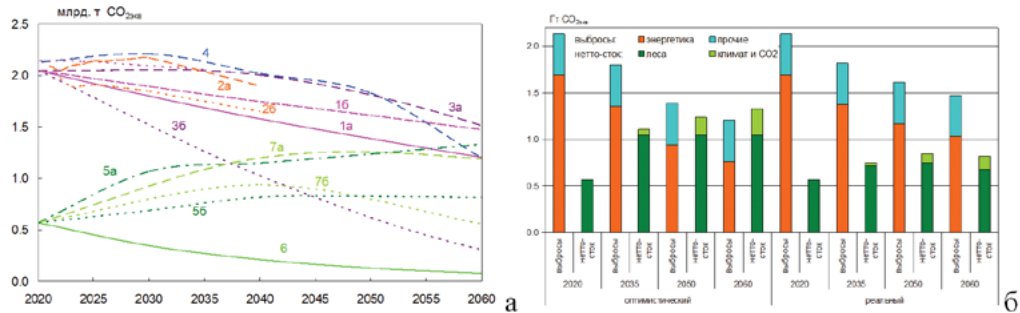


Рис. 10. Сценарии: суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) – оптимистический (1а) и реальный (16) настоящей работы, базовый (2а) и исходный (26) [18], гср4.5 (3а) и гср2.6 (36) [31], целевой (4) [7]; нетто-стока ЗИЗЛХ – оптимистический (5а) и реальный (5б) настоящей работы, базовый (6) [8], гср4.5 (7а) и гср2.6 (7б) [31] (а) и оценки суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-стока ЗИЗЛХ для оптимистического и реального сценариев настоящей работы (б)

Реализация как низкого, так и высокого сценариев не так давно утвержденной Энергетической стратегии России на период до 2035 г. [35] отодвигает начало декарбонизации и повышает к 2060 г. выбросы до 1,5-1,6 млрд. т. $\text{CO}_{2\text{экв}}$ (рис. 10). События последних двух лет согласно обновленному «базовому» сценарию ИНЭИ РАН [18] на десятилетия снижают добычу и экспорт энергоресурсов, а с ними и объем эмиссии, который следует весьма близко к **реальному** сценарию настоящей работы на горизонте до 2040 г.

Сравнение полученных в настоящей работе оценок с представленными в [31] сценариями эмиссии ПГ в России на период до 2100 г. показывает, что **оптимистический** сценарий декарбонизации лежит между вариантами максимального гср2.6 и умеренного сдерживания потепления гср4.5, ближе к последнему. Что касается наших расчетов биотического нетто-стока, то с учетом климатически обусловленного увеличения биопродуктивности лесов они близки к варианту гср4.5 [31], а без этого увеличения – к варианту гср2.6 той же работы.

Следует отметить, что оценки как современного баланса углерода в лесах России, так и его динамики в ближайшие десятилетия серьезно различаются [8-9, 19, 36-39, 41-42], причем расхождения в оценке даже современного нетто-потока, выполненные различными институтами, достигают четырехкратной величины. Далее, существуют диаметрально противоположные представления по поводу дальнейшего изменения нетто-стока – от его драматического сокращения более, чем в пять раз [9], до двукратного увеличения к середине столе-

тия (последняя концепция прямо заложена в СНУР [7]). К счастью, в последние два-три года наметилась явная тенденция к примирению столь противоположных точек зрения, что привело к появлению более взвешенных оценок, основанных не на целевых установках, а на всестороннем научном подходе, учитывающем влияние не только чисто экологических, но также экономических, политических и правовых факторов. В рамках такого подхода оказывается, что реально достижимое повышение поглощения углерода в лесах России, а именно суммарный потенциал в результате совершенствования методики государственного учета лесов, выполнения лесоклиматических проектов, снижения лесопожарной опасности может в целом составить примерно 380 млн. т $\text{CO}_{2\text{экв}}$.

к 2060 г. [10]. Однако, даже эта сдержанная оценка на наш взгляд является весьма оптимистической, поскольку не учитывает планируемое возрастание объема рубок [32] и предполагает решительное сокращение лесопожарной эмиссии в масштабах, которые до сих пор не достигнуты ни в одной стране мира, располагающей обширными массивами бореальных лесов (Канаде, США, Швеции). Поэтому в рамках нашего исследования было сочтено целесообразным в качестве реальной использовать центральную оценку между вариантом сохранения статус-кво сегодняшнего дня и упомянутой оценкой из [10], т.е. увеличение нетто-стока на 190 млн.т $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г. Такому варианту соответствует рост нетто-стока на 0,7% в год, что вполне согласуется с независимыми оценками как для недавних [36, 39], так и для предстоящих нескольких десятилетий [33, 39]. Тогда при развитии событий по реальному сценарию небаланс эмиссии и стока падает более чем вдвое от современных 1470 до 710 Мт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ к 2060 г. (рис. 9, 11), но перспектива достижения климатической нейтральности отодвигается в неопределенное будущее. Удаление столь значительной остаточной эмиссии за короткий исторический срок оказывается невозможным без построения национальной индустрии улавливания и хранения углерода (CCS) с мощностью, превосходящей мощность современной отечественной газовой промышленности (500 Мт природного газа). Это означает необходимость ввода установок CCS мощностью 18–20 Мт CO_2 ежегодно на протяжении четырех ближайших десятилетий при том, что по данным Глобального института улавливания и хранения углерода располагаемая мощность всех установок CCS в мире составляет сегодня 49 Мт $\text{CO}_{2\text{экв}}$, а Россия в настоящее время не располагает ни одной установкой CCS промышленного масштаба, и до 2030 г. их ввод не планируется [40].

Заключение

Вполне вероятно, что действительный нетто-поток углерода в леса России значительно выше того, что указывается в ежегодных национальных сообщениях. Все актуализированные оценки нетто-потока, выполненные в последние годы, и аналитические обзоры дают существенно (в 1,5–3 раза) большие величины

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ны в диапазоне от 730 до 1800 Мт CO_2 _{экв} [36-38, 39, 41-42]. Разумеется, использование оценок из верхней части диапазона самым серьезным образом может повлиять на выводы настоящей работы. Проблема заключается в том, что национальная отчетность по бюджету ПГ формируется не только на основе научных статей, но и при строгом соблюдении протокола, изложенного в руководствах Межправительственной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК) [43]. Согласно этому протоколу, оценки баланса углерода формируются на основе данных официальной инвентаризации лесов с применением вполне определенного набора уравнений, коэффициенты которых могут быть определены по имеющимся национальным данным. Эти данные подвергаются регулярной проверке экспертами РКИК и, таким образом, ни одна страна не может произвольно изменять коэффициенты уравнений, описывающих поглощение различными категориями лесов. Из всех отечественных, да и международных оценок рекомендациям МГЭИК в полной мере следует только разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН система РОБУЛ (региональная оценка бюджета углерода лесов), которая и используется с 2010 г. в Национальном кадастре ПГ [19]. Актуализированная система РОБУЛ [44] использует данные Государственного лесного реестра (ГЛР), введенного Лесным кодексом РФ в 2007 г., и, кроме динамики наземных биотических резервуаров углерода, учитывает потери углерода почвой покрытых лесом земель. Следует отметить, что инвентаризация лесов в мире – очень длительный процесс, занимающий подчас десятки лет. Так, в настоящее время в России завершен первый цикл инвентаризации лесов на основе пробных площадей в рамках ГЛР, продолжавшийся с 2007 по 2020 г. Процесс модификации методик подсчета баланса углерода, следующий за накоплением данных наблюдений, очевидно, протекает еще медленнее. В этой связи трудно рассчитывать, что в ближайшие одно-два десятилетия международно признанные оценки стока углерода в леса России будут претерпевать радикальные изменения. Мы полагаем, что в лучшем случае реально можно рассчитывать на коррекцию в рамках той же системы РОБУЛ, актуализированная версия которой с учетом баланса почвенного углерода лесов дает величину нетто-стока в (980+–370) Мт CO_2 в год для 2018 г., что на 60% выше указанной в [19]. Тем не менее, использование этой оценки не меняет принципиально выводов настоящей работы, но лишь значительно уменьшает масштаб перспективной национальной системы улавливания и хранения углерода.

Выводы

1) Падение добычи, потребления и экспорта энергоносителей, связанное с ограничениями геополитического характера, значительно ускоряет процесс декарбонизации, но само по себе не обеспечивает достижение климатической нейтральности.

2) Необходимыми, но недостаточными условиями для достижения углеродной нейтральности являются многолетнее снижение удельных (на душу населения) антропогенных выбросов ПГ со скоростью 1% в год, полная компенсация лесных вырубок за счет лесовосстановления с одновременным сокращением площадей лесных пожаров не менее чем на 50%.

3) Для покрытия перспективного небаланса необходимо либо удвоение (по сравнению с современным значением) нетто-стока в ЗИЗЛХ, что выглядит сомнительным, либо развитие технологий CCS в масштабах, которые превосходят современные глобальные мощности примерно в 15 раз.

4) С точки зрения мирового исторического опыта противостояния глобальному потеплению достижение углеродной нейтральности экономики России к 2060 г. вряд ли возможно.

В работе использованы данные Федеральной службы государственной статистики (*Росстат*, <https://rosstat.gov.ru>), информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (*Авиалесоохрана*, https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml), РКИК (<https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы Европейской Комиссии (*EDGAR*, <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>), Мирового валютного фонда (МВФ, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2022/October>), базы данных наблюдений лесов мира Института мировых ресурсов (*Global Forest Watch*, <https://www.globalforestwatch.org/>), базы данных по эмиссии от природных пожаров (*GFED*, https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/fire_emissions_v4.html), Центра климатических исследований Университета Восточной Англии (*CRU*, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), портала климатических данных Института мировых ресурсов (*WRI*, <https://www.wri.org/data/climate-watch-cait-country-greenhouse-gas-emissions-data>)

Работа выполнена в НИУ «МЭИ» при поддержке Минобрнауки России (проект FSWF-2023-0017) в части энергетических исследований и в НИТУ МИСиС при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00398) в части исследований антропогенных источников выбросов метана.

Литература

1. Клименко В. В., Терешин А. Г., Микушина О. В. Мировая энергетика и климат планеты в XXI веке в контексте исторических тенденций // *Российский Химический Журнал*. 2008. Т. LII, № 6. С. 11–17.

2. Rogelj J., Nabel J., Chen C., Hare W., Markmann K., Meinshausen M., Schaeffer M., Macey K., Höhne N. Copenhagen Accord pledges are paltry // *Nature*. 2010. Vol. 464. No. 7292. P. 1126–1128.

3. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Парижская конференция по климату – поворотный пункт в истории мировой энергетики // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 468, № 5. С. 521–524. DOI: 10.7868/S0869565216170102.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

4. Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Избежать потепления на 2°C – миссия невыполнима // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 3–8. DOI: 10.1134/S0040363616090022.

5. Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Глазго-2021: трудная дорога к цели в 1.5°C // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. С. 50–56. DOI: 10.31857/S2686740022040046.

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

7. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р).

8. Шварц Е.А., Ярошенко А.Ю., Замолодчиков Д.Г., Шматков Н.М. О новой Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Устойчивое лесопользование. 2021. № 1 (65). С. 2–6. DOI 10.12345/2308-541X_2021_65_1_2.

9. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Современное сокращение стока углерода в леса России // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 6. С. 719–721.

10. Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. № 4. С. 399–426.

11. Башмаков И.А. Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. 2020. № 7. С. 51–74.

12. Башмаков И.А. Сценарии движения России к углеродной нейтральности // Энергосбережение. 2023. № 1. С. 40–49.

13. Мастепанов А.М. Россия на пути к углеродной нейтральности // Энергетическая политика. 2022. № 1(167). С. 94–108.

14. Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е. Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 2. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0002331023020036, EDN: JXOTOM.

15. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Безуглеродная Россия: есть ли шанс достичь углеродной нейтральности к 2060 году? // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 511. С. 67–77. DOI: 10.31857/S2686740023040065, EDN: VPFUXM.

16. Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е. Пути снижения выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Промышленная энергетика. 2023. № 9. С. 8–19. DOI: 10.34831/EP.2023.67.59.00.

17. Клименко В.В., Терешин А.Г., Коликов К.С., Бернадинер И.М. Перспективы России в снижении выбросов метана и присоединении к Глобальному соглашению по метану // Энергетическая политика. 2023. № 11 (190). С. 56–73. DOI 10.46920/2409-5516_2023_11190_5. EDN: TMXGQO.

18. Исследование направлений и системы мер по управлению посткризисным восстановлением энергетики России. Отчет о НИР. М.: ИНЭИ РАН, 2022.

19. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2021 гг. (ч.1) М.: Росгидромет, 2023.

20. Указ Президента РФ от 15 июня 2022 г. № 382 «О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации».

21. Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.

22. Барталев С.А. Крупномасштабные изменения лесов России в XXI веке по данным спутниковых наблюдений // Лекции школы-конференции молодых ученых по проблемам дистанционного зондирования растительного покрова высокоширотных регионов в контексте изменения климата и других воздействий. 16-17 ноября 2020 г. М.: ИКИ РАН, 2020. http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8465_Bartalev_YSS_2020_Eng.pdf

23. Елисеев А.В., Васильева А.В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т.3. С.73–119.

24. Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Прогноз лесных пожаров РФ до конца столетия по сценариям изменения климата RCP4.5 И RCP8.5 // Мат. Всеросс. научн. конф. с междуна. участием “Научные основы устойчивого управления лесами”, посв. 30-летию ЦЭПЛ РАН 25–29 апреля 2022 г., Москва, Россия. С.260–262.

25. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2009 гг. (ч.1) / Научн. рук. Израэль Ю.А. М.: Росгидромет, 2011.

26. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2015 гг. (ч.1) М.: Росгидромет, 2017.

27. Statistical Review of World Energy 2023. London: Energy Institute, 2023. 64 p.

28. World Population Prospects 2022. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022.

29. Клименко В.В., Снытин С.Ю., Федоров М.В. Энергетика и предстоящее изменение климата в 1990-2020 гг. // Теплоэнергетика. 1990. № 6. С. 14–20.

30. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Известия

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 158–168. DOI: 10.7868/S0002351515020078

31. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 10. С. 18–32. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-18-32

32. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р)

33. Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Влияние изменений атмосферы и климата на энергетический потенциал лесов России // *Доклады РАН*. 2019. Т. 488, № 6. С. 612–618. DOI: 10.31857/s0869-56524886612-618

34. Fernández-Martínez M., Peñuelas J., Chevallier F., Ciais P., Obersteiner M., Rödenbeck C., Sardans J., Vicca S., Yang H., Sitch S., Friedlingstein P., Arora V.K., Goll D.S., Jain A.K., Lombardozzi D.L., McGuire P.C., Janssens I.A. Diagnosing destabilization risk in global land carbon sinks // *Nature*. 2023. Vol. 615. P. 848–856. DOI: 10.1038/s41586-023-05725-1

35. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р).

36. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. № 11. Id. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.

37. Филипчук А.В., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. Аналитический обзор методик учета выбросов и поглощения лесами парниковых газов атмосферы // *Лесохозяйственная информация*. 2016. № 3. С. 36–85.

38. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais D., Tchebakova N., Chen T., Van der Molen M.K. et al. An Estimate of the Terrestrial Carbon Budget of Russia Using Inventory-Based, Eddy Covariance and Inversion Methods // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9, No. 12. P. 5323–5340.

39. Arneeth A., Makkone R., Olin S., Paasonen P., Holst T., Kajos M. K., Kulmala M., Maximov T., Miller P. A., Schurgers, G. Future vegetation-climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO₂ and secondary organic aerosols // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. P. 5243–5262.

40. The Global Status of Carbon Capture and Storage 2023. Melbourne, Australia: Global CCS Institute, 2023. 98 p.

41. Harris N. L., Gibbs D. A., Baccini A., Birdsey R., de Bruin S., Farina M., Fatoyinbo L., Hansen M. C., Herold M., Houghton R. A., Potapov P. V., Suarez D. R., Roman-Cuesta R. M., Saatchi S. S., Slay C. M., Turubanova S., Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // *Nature Climate Change*. 2021. V. 11. P. 234–240

42. Wang H., Jiang F., Wang J., Ju W., Chen J. M. Terrestrial ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2X CO₂ retrievals // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19, No. 18, P. 12067–12082

43. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (eds). Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland: IPCC, 2019

44. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Новая оценка баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М.: 2021. С. 153-173.

РОССИЯ: УТРОЕНИЕ МОЩНОСТИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И УДВОЕНИЕ ТЕМПОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ К 2030 г.

И.А. Башмаков*, А.А. Лунин

Центр энергоэффективности – XXI век

**cenef@co.ru*

Аннотация. Данная статья посвящена ответу на вопрос: может ли Россия подписать Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности (*Global Renewables and Energy Efficiency Pledge*) и взять на себя обязательства и в его рамках утроить мощность источников ВИЭ и удвоить темпы повышения энергоэффективности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, парниковые газы, декарбонизация

1. МЭА. Пять опор глобального перехода на траекторию 1,5°C

В преддверии COP-28 8-я ежегодная глобальная конференция по энергоэффективности (The 8th Annual Global Conference on Energy Efficiency)¹ призвала увеличить темпы повышения энергоэффективности до 4% в год. Позже МЭА сформулировало пять критериев успеха движения по траектории декарбонизации, позволяющей удержать глобальное потепление в границах 1,5°C²:

- Утроить глобальную мощность источников ВИЭ.
- Удвоить темпы повышения энергоэффективности.
- Принять обязательства со стороны компаний, добывающих ископаемые топлива, и сократить выбросы метана на 75%.
- Создать крупномасштабные механизмы финансирования, позволяющие утроить инвестиции в чистую энергетику в странах с формирующейся рыночной экономикой и развивающихся странах.
- Принять обязательства по реализации мер, обеспечивающих планомерное сокращение использования ископаемого топлива, включая прекращение выдачи разрешений на строительство новых угольных электростанций.

Реализация этих мер до 2030 г. предполагает использование только уже применяемых технологий, что снижает как затраты, так и риски.

¹ <https://www.iea-events.org/8th-global-conference>.

² What does COP28 need to do to keep 1.5 °C within reach? These are the IEA's five criteria for success – Analysis - IEA.

2. Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности

Обязательства по первому и второму пунктам были оформлены как *Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности (Global Renewables and Energy Efficiency Pledge)*. Под этим документом подписались 124 страны.³ В их число не вошли ключевые страны БРИКС: ни Россия, ни Китай, ни Индия, ни Южная Африка.⁴ У каждой из этих стран, по-видимому, были свои причины для такого решения.

Задача данной работы – понять:

- что для России означает «утроить мощность источников ВИЭ и удвоить темпы повышения энергоэффективности»?
- может ли Россия до 2030 года утроить мощность источников ВИЭ и удвоить темпы повышения энергоэффективности?

Ответ на первый вопрос не однозначный. В части мощности источников ВИЭ важно определиться с их перечнем и границами учета – только централизованные источники или централизованные и децентрализованные. В документе *Global Renewables and Energy Efficiency Pledge* указано, что цель для мира в целом – доведение мощностей ВИЭ к 2030 году до как минимум 11 000 ГВт. В отношении повышения темпов энергоэффективности в этом документе дана формулировка – «необходимо удвоить глобальный среднегодовой темп повышение энергоэффективности примерно с 2% до более 4% каждый год до 2030 года».

Страны, подписавшие *Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности (Global Renewables and Energy Efficiency Pledge)*, взяли на себя обязательства:⁵

- работать вместе, чтобы коллективно удвоить глобальные среднегодовые темпы повышения энергоэффективности примерно с 2% до более 4% каждый год до 2030 года;
- поставить принцип энергоэффективности в качестве «первого топлива» в основу принятия политических решений, планирования и принятия крупных инвестиционных решений;
- предпринять комплексные внутренние действия для содействия выполнению этого обязательства, в том числе путем принятия амбициозной национальной политики в области возобновляемых источников энергии и энергоэффективности и отражения этих амбиций в ОНУВ, работая с городами и субнациональными правительствами, уделяя особое внимание ключевым инструментам и наиболее актуальным факторам реализации, национальным и местным обстоятельствам;
- сотрудничать в области устойчивых цепочек создания стоимости и развития технологий, в том числе посредством добровольной передачи на взаимосогласованных условиях;

³ IEA assessment of the evolving pledges at COP28 - News - IEA.

⁴ COP28: Global Renewables And Energy Efficiency Pledge.

⁵ Там же.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

- расширить финансовую поддержку для масштабирования программ возобновляемой энергетики и энергоэффективности на развивающихся рынках и в развивающихся странах, включая инвестиции из нескольких источников со стороны частного сектора, многосторонних банков развития и благотворительной деятельности;
- сотрудничать в области доступных механизмов финансирования для снижения стоимости капитала на развивающихся рынках и в развивающихся странах;
- усилить техническую поддержку и наращивание потенциала развивающихся стран, использующих возобновляемые источники энергии и энергоэффективность;
- ускорить трансграничные межсетевые соединения;
- ускорить выдачу разрешений на проекты возобновляемых источников энергии и связанную с ними инфраструктуру;
- развивать и расширять сетевые соединения, а также улучшать интеграцию энергетических систем;
- обеспечить ясность в отношении структуры рынка и схем стимулирования, а также укрепить рыночные условия и инвестиционный климат для облегчения инвестиций в возобновляемые источники энергии и энергоэффективность;
- содействовать энергоэффективности, электрификации и управлению спросом на энергию во всех соответствующих секторах;
- повышать осведомленность общественности и поощрять изменение поведения;
- поощрять увеличение и значимость частных и государственных инвестиций из нескольких источников, особенно для развивающихся стран;
- совершенствовать и масштабировать новые технологические решения, в том числе посредством поддержки исследований, разработок и инноваций;
- обеспечить, чтобы меры политики способствовали справедливому энергетическому переходу, расширяя возможности потребителей и поддерживая развитие квалифицированной рабочей силы в области возобновляемых источников энергии и энергоэффективности, поддерживая нынешних работников энергетики, которые рискуют быть вытесненными в результате энергетического перехода, способствуя продуктивной реконверсии застрявших активов и гарантируя, что сообщества, затронутые этим переходом, также извлекут выгоду из возможностей, предлагаемых энергетическим переходом;
- обеспечить, чтобы усилия по расширению использования возобновляемых источников энергии и повышению эффективности проводились экологически ответственным образом;
- рассмотреть возможность поддержки существующих международных инициатив, таких, как те, что изложены в Программе энергетического прорыва (*Power Breakthrough Agenda*), для продвижения технической и политической работы, которая послужит основой действий в рамках этого обязательства;
- согласовать дальнейшие действия по рассмотрению прогресса в выполнении *Глобального обязательства по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности* на ежегодной основе до 2030 года, например, посредством специальных министерских совещаний и ежегодных отчетов о глобальном про-

грессе в достижении целей этого обязательства, отмечая использование существующих флагманских обязательств, отчеты МЭА и IRENA.

Если предполагается утроить глобальные мощности источников ВИЭ и довести их до уровня 11000 ГВт в 2030 г., то исходный уровень установленной мощности в 2022 г. получается равным 3667 ГВт. Это означает, что речь идет только об электрогенерирующих мощностях, а перечень технологий ВИЭ включает ГЭС, ВЭС, СЭС, БиоГЭС, ГеоГЭС, приливные и другие электростанции на ВИЭ. Возможно, именно включение ГЭС привело к тому, что ряд стран с высокой долей ГЭС в структуре генерации отказались подписывать *Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности*. В России в 2022-2023 гг. на ГЭС пришлось около 17% генерации электроэнергии и 50 ГВт мощности. Утроение означало бы доведение доли ГЭС в выработке до 51% и 150 ГВт уже в 2030 г. Это нереалистично. Даже в прогнозе МЭА с нетто-нулевыми выбросами мировые мощности ГЭС в 2022-2030 гг. растут только на 27% (IEA, 2023).

МЭА стоило бы сформулировать задачу по-другому:

- расширить охват ВИЭ с включением в них ВИЭ и для производства тепловой энергии, но
- оставить на усмотрение стран включение или исключение крупных ГЭС в сферу охвата.

В данной работе крупные ГЭС из анализа исключаются и рассматривается возможность утроения мощностей ВИЭ по трем индикаторам:

- мощности централизованных электроустановок на ВИЭ по перечню схемы ДПМ (ВЭС, СЭС, и мини-ГЭС);
- мощности централизованных и децентрализованных электроустановок на ВИЭ (ВЭС, СЭС и мини-ГЭС);
- мощности централизованных и децентрализованных электро- и теплогенерирующих установок на ВИЭ: ВЭС, СЭС, мини-ГЭС, солнечные водоподогреватели, тепловые насосы, котлы на биомассе.

В отношении повышения энергоэффективности количественная цель сформулирована только для глобального показателя – коллективное удвоение глобальных среднегодовых темпов повышения энергоэффективности примерно с 2% до более 4% в год до 2030 года. Простой расчет показывает, что при равенстве темпов повышения энергоэффективности во всех странах их удвоение приведет к почти удвоению глобальных темпов повышения энергоэффективности. Отклонение определяется разницей в исходных уровнях и темпах снижения энергоемкости и темпах экономического роста для разных стран. Но это не является единственным решением задачи. Может быть много других комбинаций при неравномерном повышении энергоэффективности. Для отдельных стран решение задачи удвоения заметно отличается от решения задачи достижения темпов повышения энергоэффективности на 4%.

Ни в формулировке МЭА, ни в тексте *Глобального обязательства по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности* не указан точно показатель энергоэффективности, темпы которого нужно удвоить. По умолчанию в этом качестве может выступать энергоемкость ВВП мира или страны. Однако

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

при расчете этого показателя в числителе используется потребление топлива на неэнергетические нужды. В 1971 году в мире в целом на эти цели приходилось 4,3% всего потребления первичной энергии, а в последние годы – 6,3%. В Южной Корее за эти годы эта доля выросла с 3,7% до 18,8%. В Нидерландах в 1960 году она была равна 1,7%, а в 2019 году составила 17%. В России она выросла с 5,8% в 2000 г. до 15,3% в 2021 г. и снизилась до 13,4% в 2022 г. Это означает, что энергоемкость снижалась бы быстрее, если бы не учитывался расход топлива на сырьевые нужды. Поэтому при расчете энергоемкости ВВП потребление топлива на сырьевые нужды следует вычитать. Таким образом, есть альтернативный показатель – динамика энергоемкости ВВП (без учета неэнергетических нужд).

Со времени принятия Государственной программы Российской Федерации «*Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г.*» в России используется еще один индикатор – снижение энергоемкости ВВП за счет технологического фактора. Его мониторинг ежегодно ведет ЦЭНЭФ-ХХІ по модели МТФК-16-80-ПГ на основе Приказа Минэкономки России от 1 августа 2019 г. № 471 «Об утверждении методики расчета энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации и оценки вклада отдельных факторов в динамику энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации». В рамках этой системы также рассчитывается индекс энергоэффективности – снижение энергоемкости экономики только за счет технологического фактора.

Таким образом, важно оценить возможности России по удвоению темпов повышения энергоэффективности по каждому из пяти индикаторов:

- снижение энергоемкости ВВП по первичной энергии;
- снижение энергоемкости ВВП по конечной энергии;
- снижение энергоемкости ВВП по первичной энергии без учета неэнергетических нужд;
- снижение энергоемкости ВВП по конечной энергии без учета неэнергетических нужд;
- снижение энергоемкости ВВП за счет технологического фактора.

3. Пределы изменений

Как показывают эмпирические данные, снижение энергоемкости ВВП на 4% в год на протяжении десятилетия возможно только в специфических условиях, обеспечивающих высокий вклад структурного фактора. Ограничено ли повышение глобальной энергетической эффективности уровнем 2% в год? Можно ли его повысить до 4% в год? Обсуждение «пределов роста» следует сместить в сторону обсуждения «пределов изменений». Исследования по смягчению последствий изменения климата при движении к безуглеродной экономике в ближайшие 30 лет либо предполагают, либо моделируют снижение энергоемкости глобального ВВП в среднем на 3-3,5% в год (bp, 2023; IEA, 2023; IRENA, 2022; Riahi et al., 2022). Для сотен сценариев, которые ограничивают глобальное потепление уровнем 1,5°C, ожидается снижение энергоемкости (по конечной энергии) на

2,7-3,3% к 2030 г., на 2,6-2,7% к 2050 г. и на 1,7-1,8% к 2100 г. На многовековом временном горизонте энергоёмкость глобального ВВП снижалась примерно на 1% в год (Башмаков, 2019). На временном горизонте, ограниченном последними десятилетиями, для мира в целом энергоёмкость ВВП (по первичной энергии) снижалась на 1,44% в 1990-2000 гг., на 1,08% в 2000-2010 гг. и на 1,65% в 2010-2022 гг. (см. рис. 1).

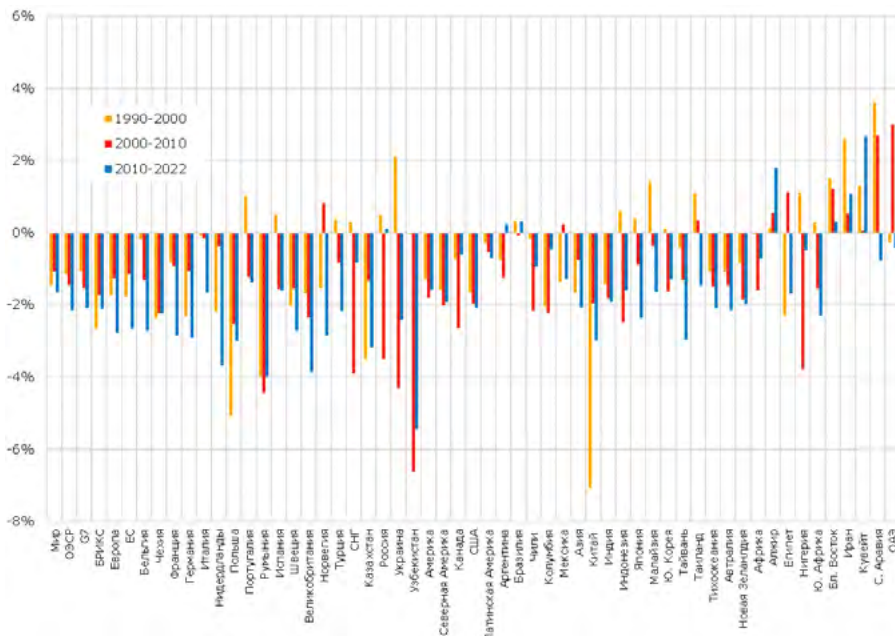


Рис. 1. Динамика энергоёмкости ВВП ведущих стран и регионов мира
Источник: Enerdata. 2023.

Рубеж в 4% пересекался только несколько раз. Только Румынии, которая постепенно избавляется от наследия энергорасточительной централизованной экономики, удалось удерживать темп снижения энергоёмкости около 4% в год в 1990-2022 гг. По той же причине в 1990-2000 гг. это удалось Польше, в 2000-2010 гг. – Украине, а в 2000-2022 гг. – Узбекистану и Нигерии. В 1990-2000 гг. уровень 4% заметно превзошел Китай. Снижение энергоёмкости на уровне 3-4% в год возможно только для стран с существенными структурными сдвигами в экономике. В случае с Китаем это отставание роста жилого фонда от роста ВВП при очень быстром росте последнего. За счет этого структурного сдвига было обеспечено 63% снижения энергоёмкости ВВП. Когда темпы роста ВВП ограничены 3% в год, разрыв с ростом жилой площади является умеренным и такой структурный сдвиг вносит лишь ограниченный вклад: 20% в США в 1971-2019 годах. Переход от плановой к рыночной экономике также порождает заметные структурные изменения в экономике, что приводит к ускоренному снижению энергоёмкости ВВП за счет сворачивания неконкурентоспособных производств.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Впечатляют достижения Великобритании и Нидерландов, которым после 2010 г. также удалось выйти на темпы снижения энергоемкости ВВП около 4% в год. Для Великобритании это в значительной степени результат структурных изменений, которые в основном явились результатом оффшоринга – переноса энергоемких производств в другие страны (Hardt et al., 2018), но не только. Важную роль сыграл рост выработки первичной энергии на ВИЭ (см. обсуждение ниже). В Нидерландах после 2010 г. к этим факторам прибавилось снижение потребления топлива на неэнергетические нужды, что ускорило снижение энергоемкости ВВП на 0,4% в год (Eurostat, 2024).

Урок прошлого сводится к тому, что в 1990-2020 годах человечеству не удалось ускорить среднегодовые темпы снижения энергоемкости ППП сверх дополнительных 0,5% даже при введении во многих странах энергетических, экологических и углеродных налогов и значительных улучшений в административных и рыночных механизмах для содействия энергоэффективности (Башмаков, 2022). В 1992 году автор сформировал глобальный энергетический прогноз до 2020 г., результаты которого были опубликованы в книге «Мировая энергетика: уроки будущего» (Башмаков, 1992). В первых шести сценариях было смоделировано снижение энергоемкости мирового ВВП примерно на 1% в год. В сценарии «Энергосбережение: новые стимулы», где экологические и климатические факторы рассматривались как важные факторы энергосбережения, было смоделировано снижение энергопотребления на 1,5% в год. Фактически, в 1990-2020 гг. энергоемкость ППП снижалась на 1,1-1,5% в год в зависимости от показателя (первичная или конечная энергия, ППП по обменным курсам или в ППС).

Для снижения энергоемкости на 2% при росте глобального ВВП на 3% в год необходимо: ежегодно выводить из эксплуатации 3% устаревших производственных фондов, зданий и сооружений с наибольшей энергоемкостью (значительно больше, чем делается на практике); ежегодно модернизировать не менее 3% мощностей с сокращением удельного энергопотребления не менее чем на 25% (на практике оба показателя ниже), а также ежегодно вводить в эксплуатацию не менее 6% новых активов с удельным энергопотреблением на 50% ниже среднего (практически оба показателя также ниже). Для достижения снижения энергоемкости мирового ВВП на 4% все перечисленные выше доли вывода из эксплуатации, модернизации и ввода в эксплуатацию необходимо удвоить. Это возможно только теоретически, а на практике, видимо, нет, тем более что ряд промышленных технологий приближаются к термодинамическим минимумам и 50-процентное снижение удельного энергопотребления там просто невозможно.

Решение задачи утروения глобальной мощности источников ВИЭ является важным условием решения задачи удвоения темпов повышения энергоэффективности. Есть несколько многообещающих дополнительных возможностей для снижения энергоемкости: рост доли ВИЭ в энергобалансе, электрификация конечного потребления энергии, повышение эффективности использования материалов и достаточность. Производство электроэнергии на базе гидро-, солнечной и ветровой энергии считается 100%-эффективным при учете по первичной

энергии. Растущая доля этих первичных источников энергии, скажем, с нуля до половины за 10-12 лет при заданном уровне конечного энергопотребления может способствовать снижению энергоёмкости ВВП на 1% в год. Это подтверждается данными по Великобритании. Согласно базе данных МЭА, в 2010-2019 гг. энергоёмкость ВВП по первичной энергии снижалась на 3,7% в год, что на 0,95% больше снижения энергоёмкости по конечной энергии (2,7% в год). В 2010-2022 гг. разница снизилась до 0,94%. Она сформировалась благодаря тому, что доля потерь при производстве и преобразовании энергии в суммарном потреблении первичной энергии снизилась с 33% в 2010 г. до 25% в 2022 г (UK ENERGY IN BRIEF, 2023).

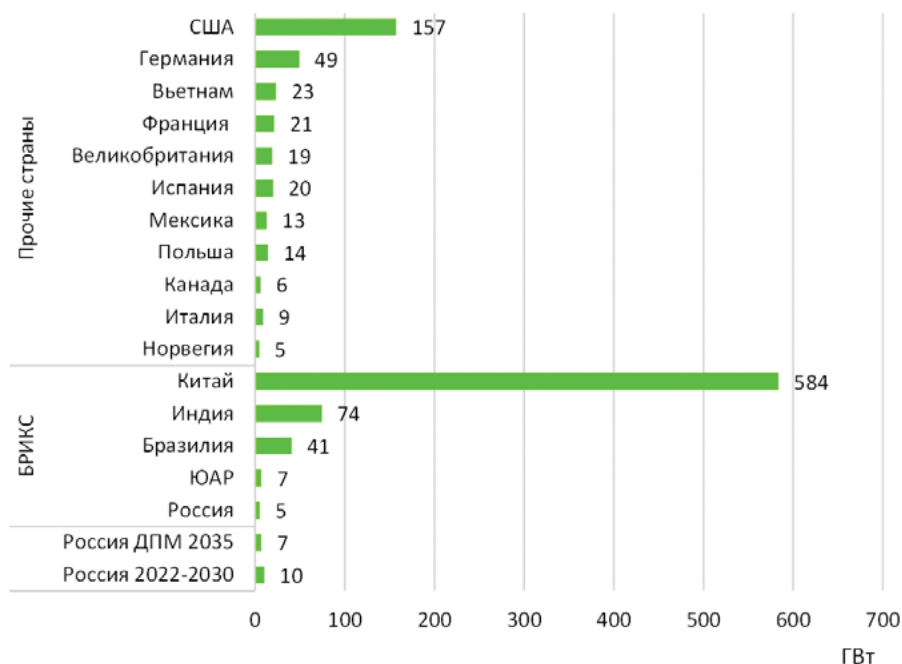


Рис. 2. Прирост мощности СЭС и ВЭС (ГВт) в 2015-2022 гг. по странам
Источник: IRENA, 2023.

Процесс электрификации конечного использования энергии, в первую очередь, внедрение электромобилей и тепловых насосов, может повысить эффективность преобразования конечной энергии в полезную, поскольку эти технологии имеют примерно в 3 раза более высокую энергоэффективность по сравнению с традиционными. Это может добавить к темпам снижения энергоёмкости еще около 1% в год при условии выработки электроэнергии на ВИЭ. В отличие от энергоэффективности, существенного прогресса в повышении материальной эффективности мировой экономики с 1900 года не произошло (Bashmakov et al., 2022). В будущем прогресс в эффективности использования материалов и использования вторичных ресурсов может также способствовать повышению энергоэффективности, но оценить этот вклад пока трудно. Что касается управ-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ления спросом и достаточности⁶, то этот фактор может проявляться через снижение материалоемкости, хотя баланс его влияния на потребность в энергии и материалах и на динамику ВВП еще мало изучен.

В отношении ввода мощностей ВИЭ для решения задачи их утроения Россия далека от пределов достижимого. В 2015-2022 гг. Россия заметно уступила многим странам, включая все основные страны БРИКС (см. рис. 2). Вводы мощностей ВЭС и СЭС составили лишь 10% от вводов в Германии. Вводы мощностей СЭС и ВЭС до 2030 г., необходимые для их утроения, также выглядят умеренными на фоне ретроспективы по другим странам. Они скромнее, чем вводы в Польше в 2015-2022 гг.

4. Базовые уровни для России

4.1. Ретроспективная динамика мощностей ВИЭ

За последние годы в отношении доли ВИЭ (без ГЭС и биомассы) в России произошел переход от бесконечно малых к малым величинам. По данным Росстата, на долю безуглеродной генерации в России приходилось: 32% всех мощностей в 2022 г.; 64% прироста мощностей в 2015-2022 гг., в т.ч. за счет ВИЭ – 38%, а за счет ВЭС и СЭС – 26%. По данным Росстата, установленная мощность 41718 электрических станций России на конец 2022 г. составила 269,7 ГВт, из них: АЭС – 29,6 ГВт; ГЭС – 52,5 ГВт; ТЭС и ТЭЦ – 183,7 ГВт; ВЭС – 1,7 ГВт; СЭС – 2,1 ГВт; ГАЭС – 1,2 ГВт; ГеоТЭС – 0,075 ГВт. Только часть этих мощностей работает на единую энергосистему. По данным системного оператора единой энергетической системы России (СО ЕЭС России), мощность электрических станции в ее составе на конец 2023 года составила 250,2 ГВт, из них: АЭС – 29,5 ГВт; ГЭС – 50,2 ГВт; ТЭС – 163,7 ГВт (119,7 ГВт газовых ТЭС и 43,3 ГВт угольных ТЭС); ВЭС – 2,5 ГВт; СЭС – 2,2 ГВт; ГАЭС – 1,2 ГВт; ГеоТЭС – 0,07 ГВт и БиоТЭС – 0,7 ГВт. Доля АЭС в составе мощности равна 11,8%, ГЭС – 20,1%; ТЭС – 65,4%; ВЭС – 1,01%; СЭС – 0,87%; ГАЭС – 0,49%; ГеоТЭС – 0,03% и БиоТЭС – 0,28%.

Данные разных источников информации по мощности ВИЭ в России различаются в зависимости от охвата рынков электроэнергии. За пределами общесетевых объектов ЕЭС России есть децентрализованные установки:

- промышленных и других предприятий;
- расположенные в изолированных системах энергоснабжения;
- микрогенерации у населения.

Сравнение данных из разных источников показано в табл. 1 и на рис. 3. На основе этих источников сформированы оценки, по мнению авторов, наиболее полно характеризующие охват мощностей генерации электроэнергии на базе ВИЭ (за исключением крупных ГЭС). В основном выбраны наиболее высокие оценки в предположении, что охват источников в них наиболее полный.

⁶ A resilient and resource-wise Europe: sufficiency at the heart of the EU's future. sufficiency_manifesto.pdf (negawatt.org)

Табл. 1. Оценки установленной мощности источников ВИЭ (без крупных ГЭС) в России в 2015-2023 гг. (МВт)

		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2022-2015	2022-2015
СЭС	Выбрано	446	536	534	834	1418	1728	2003	2140	2170	1694	4,8
	Минэнерго	330	365	425	490	1028	1725	1979	2140		1810	
	СО ЕЭС	60	75	534	834	1363	1727	1961	2116	2170	2055	
	Росстат	446	536		677	1418	1728	2003	2123		1677	
	IRENA	61	76	225	535	1276	1428	1661	1816		1755	
	РЭА	75	150	550	700	1350	1750	1977				
	АРВЭ	360	430	540	830	1430	1770	1990	2150	2190	1790	
ВЭС	Выбрано	101	96	134	184	184	1089	2035	2298	2518	2197	22,7
	Минэнерго	101	95	95	105	159	884	2012	2183		2082	
	СО ЕЭС	11	11	134	184	184	1028	2035	2298	2518	2288	
	Росстат	100	96		161	161	1089	1439	1667		1567	
	IRENA	11	11	11	52	102	945	1955	2218		2207	
	РЭА	68	75	200	250	275	950	2035				
	АРВЭ	100	10	140	200	200	1040	2050	2280	2530	2180	
МГЭС (< 25 МВт)	Выбрано	137	131	116	120	124	203	386	462		325	3,4
	Минэнерго	137	131	116	120	124	203	281	283		146	
	Росстат							386	462		462	
ГеоГЭС	Выбрано	74	74	74	74	74	74	74	74			1,0
	Минэнерго	78	78	74			74	74	74		-4	
	Росстат	74	74		74		74		75		1	
	IRENA	78	78	74	74	81	74	74	74		-4	
	АРВЭ	70	70	70	70	80	80	80	80		10	
БюлГЭС	Выбрано	30	120	20	10	10	30	53	81		51	2,7
	Минэнерго						4	53	81			
	АРВЭ	1370	1370	1370		1373	1373	1373	1373	1373		3
ВИЭ в ИС*	Выбрано				9		25		73			
	АРВЭ								73			
	РЭА								48			
	ЦЭНЭФ-XXI				9							
Прим генерация	Выбрано					100			100			
	АРВЭ								12			
	РЭА								6			
	ЦЭНЭФ-XXI					100			100			
Население	Выбрано					30		32	33			
	ЦЭНЭФ-XXI					30		32	33			
	АРВЭ							23				
СЭС и ВЭИ	Выбрано	547	632	669	1018	1602	2817	4038	4644	4687	4097	8,5
Итого ВИЭ	Выбрано	883	957	878	1231	1946	3155	4589	5267		4384	6,0

*ИС – изолированные энергосистемы.

Источники: Минэнерго России – форма 6-ТП (ранее ее готовил Росстат); Росстат (формы электробаланса); СО ЕЭС. Отчеты о функционировании ЕЭС России в 2015-2023 гг. Население – Башмаков и др. 2023б.; ЦЭНЭФ-XXI. 2021; Жихарев, 2024; IRENA, 2023.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Для решения задачи утроения мощностей ВИЭ в зависимости от охвата рынков электроэнергии и видов ВИЭ генерации прирост мощностей в 2022-2030 гг. должен составить 9-11 ГВт. Мощности СЭС и ВЭС, включая децентрализованные источники, в 2022 г. достигли 4644 МВт, из которых на долю оптового и розничного рынков приходится 4438 МВт. Утроение первых к 2030 г. означает доведение суммарной мощности до 13932 МВт, или ее прирост на 9288 МВт, а вторых – до 13314 ГВт, или прирост на 8876 ГВт. Мощности всех ВИЭ, рассмотренных в табл. 1, в 2022 г. составили 5267 МВт. Их утроение к 2030 г. означает доведение суммарной мощности до 15801 МВт, или ее прирост на 10534 МВт. В соответствии с графиком реализации ДПМ 2.0 ожидается, что мощности общесетевых ВЭС и СЭС в 2030 г. составят 10,4 ГВт (Башмаков и др., 2023а). Таким образом, по сравнению с этим графиком дополнительный ввод мощности для решения задачи утроения составляет только 1,5 ГВт (10,4-8,9). Для обеспечения движения по траектории углеродной нейтральности таких вводов мощности ВЭС и СЭС к 2030 г. достаточно (Башмаков и др., 2023б).

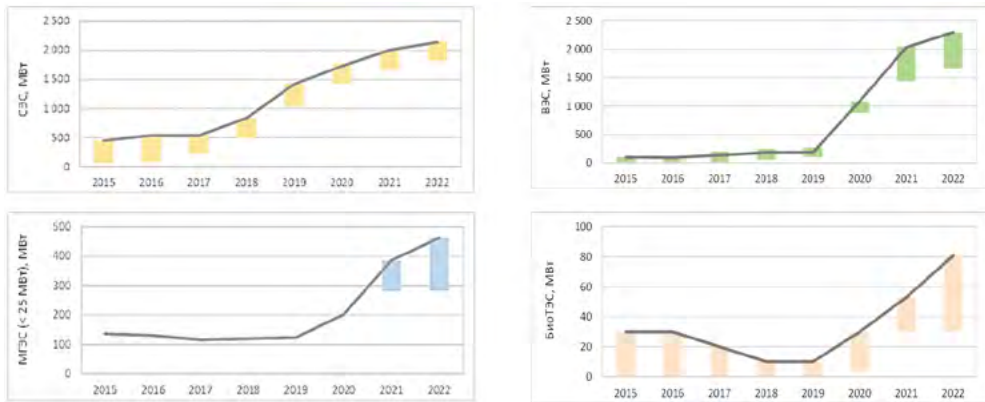


Рис. 3. Оценки мощностей отдельных видов ВИЭ генерации

Источники: см. источники к табл. 1

Для утроения децентрализованных мощностей ВЭС и СЭС бизнес должен увеличить их к 2030 г. на 100-200 МВт. Это в основном мощности СЭС. По имеющимся данным, в 2023 г. эти мощности оцениваются в диапазоне 50-100 МВт.⁷ Утроение означает их наращивание до 150-300 МВт, или на 100-200 МВт, или на 12,5-25 МВт в год. Для изолированных энергосистем для утроения требуется ввод 146 МВт (ВЭС и СЭС) к 2030 г.

Планы наращивания мощности микрогенерации до 1 ГВт к 2030 г. обсуждались в качестве целевого показателя социально-экономического развития России, но не были зафиксированы в нормативных документах.⁸ В жилом секторе в основном используются СЭС-установки. Статистика по ним не ведётся. По

⁷ Бизнес увеличил закупку солнечных панелей из-за роста тарифов на электричество (kommersant.ru)

⁸ <https://www.pnp.ru/economics/senator-rasskazal-o-merakh-podderzhki-razvitiya-mikrogeneracii-v-rossii.html>

оценке ЦЭНЭФ-XXI (Башмаков и др., 2023б), их мощность составила 33 МВт (см. табл. 1) и прирастала в год примерно на 1 МВт. Для ее утроения потребуется прирост мощностей в размере 66 МВт, или в среднем на 8,25 МВт в год. При средней мощности установки 6 кВт это означает оснащение ими 1375 жилых зданий в год. Это скромная цель на фоне планировавшегося оснащения 100 тыс. жилых зданий к 2030 г. для достижения уровня мощности 1 ГВт. По оценкам ЦЭНЭФ-XXI, для движения по траектории углеродной нейтральности нужно ежегодно вводить не менее 18 МВт мощностей микрогенерации в 2023-2030 гг. (Башмаков и др., 2023б).

4.2. Ретроспективная динамика индикаторов энергоэффективности

Помимо двух основных модификаций показателя энергоемкости ВВП – с учетом и без учета неэнергетических нужд – есть еще четыре:

- при расчете потребления первичной энергии по балансу сверху – производство первичных энергоресурсов, скорректированное на внешнюю торговлю ими и изменение запасов;
- по балансу снизу – сумма оцененного по данным статистики потребления первичной энергии по всем секторам. В России статистическая невязка единого топливно-энергетического баланса значительна, поэтому эти оценки не совпадают;
- при расчете по потреблению конечной энергии;
- при расчете по потреблению конечной энергии за вычетом неэнергетических нужд.

В 2015-2022 гг. шесть модификаций показателя энергоемкости ВВП России колебались вокруг относительно стабильных уровней, не показывая выраженной тенденции ни к росту, ни к снижению (см. рис. 4). Вывод о сохранении энергоемкости ВВП примерно на одном уровне после 2015 года согласуется с оценками ее динамики в зарубежных источниках при некотором разбросе самих оценок (Enerdata, 2023). Однако показатель энергоемкости ВВП по конечной энергии рос на 0,7% в год.

В России энергоемкость ВВП ни по первичной, ни по конечной энергии в 2015-2022 гг. не снижалась. То есть удвоить ее *снижение* к 2030 г. невозможно. Энергоемкость ВВП по сумме секторов также не снижалась. Не снижалась и энергоемкость ВВП по сумме секторов без учета неэнергетических нужд. Снижался только один показатель - энергоемкость ВВП без учета неэнергетических нужд – в 2015-2022 гг. в среднем на 0,5% в год. Таким образом, формально для решения задачи удвоения темпов повышения энергоэффективности достаточно обеспечить снижение энергоемкости ВВП без учета неэнергетических нужд в среднем на 1% в год до 2030 г. Значит, в отличие от мира в целом, для выполнения *Глобального обязательства по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности достаточно снизить* энергоемкость ВВП (без учета неэнергетических нужд) примерно на 1% в год.

В части повышения энергоэффективности важно также провести анализ возможности обеспечить снижение энергоемкости ВВП Российской Федерации как

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

с учетом, так без учета неэнергетических нужд, на 3% в год. Целевая установка принятой в 2023 г. Комплексной государственной программы Российской Федерации «*Энергосбережение и повышение энергетической эффективности*»⁹ – снижение энергоемкости ВВП на 35% в 2035 г. по отношению к уровню 2019 г. – предполагает ее снижение в среднем на 2,7% в год. Непонятно, почему Россия не подписались под *Глобальным обязательством по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности (Global Renewables and Energy Efficiency Pledge)*, если официально установлена цель более динамичного снижения энергоемкости. С учетом роста энергоемкости ВВП в 2019-2022 гг. (см. рис. 4) получается, что для достижения цели этой программы в 2022-2035 гг. снижение должно составить в среднем 3,1% в год. Это уже близко к целевому значению 4%, предложенному МЭА.

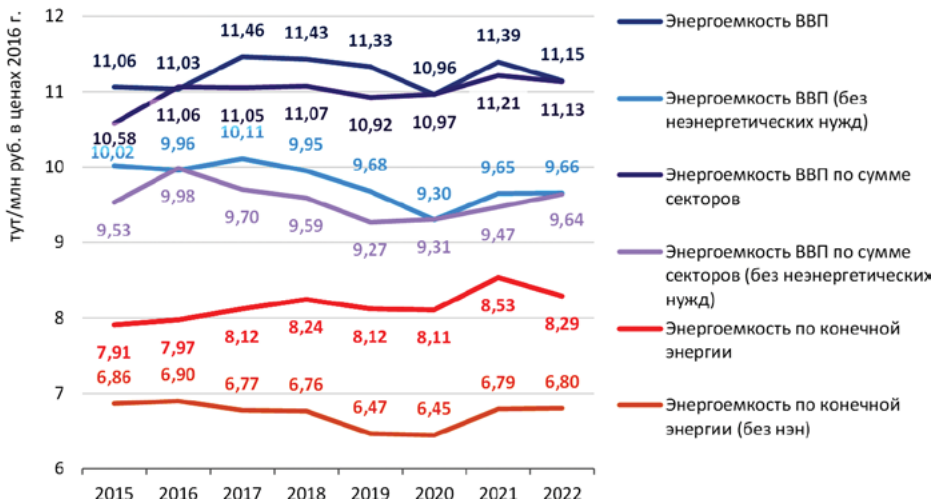
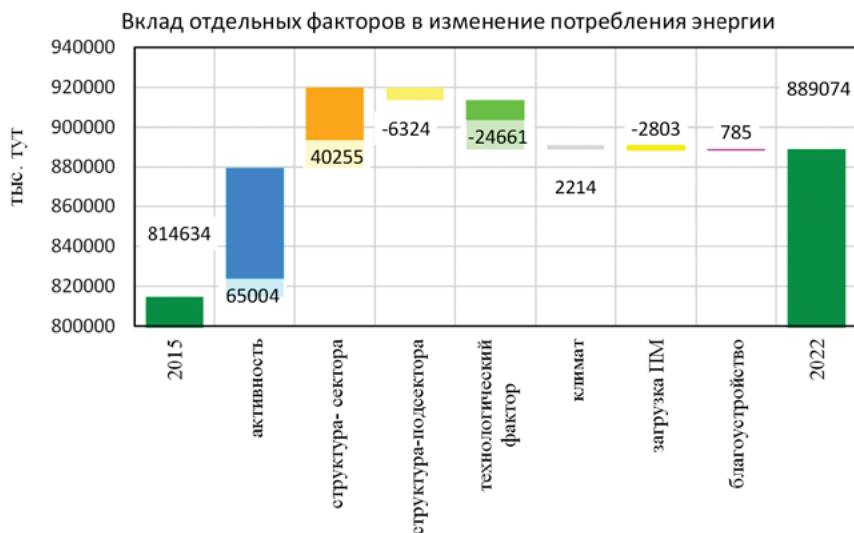


Рис. 4. Динамика энергоемкости ВВП Российской Федерации в 2015-2022 годах

Еще одна возможная интерпретация удвоения темпов повышения энергоэффективности – удвоение темпа снижения энергоемкости ВВП за счет вклада технологического фактора. В 2009 г. была поставлена задача снижения энергоемкости ВВП на 40% к 2020 г. В Государственной программе РФ «*Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года*» была сформулирована целевая установка снижения энергоемкости ВВП за счет реализации программы 13,5%. Еще 6,7% снижения должно было быть обеспечено за счет автономного (не зависящего от мер программы) технологического прогресса. Остальные почти 20% снижения должны были быть обеспечены структурными и продуктовыми сдвигами. Динамика потребления энергии и энергоемкости ВВП определяется большим числом факторов, многие из которых либо не управляемы вовсе (климатические условия), либо не управляемы национальным

⁹ <http://static.government.ru/media/files/xQ1UWgkZNLrI09zNT6PTlnfK0EsXfxVS.pdf>.

правительством (структурные и продуктовые сдвиги в экономике и загрузка производственных мощностей за счет изменения конъюнктуры внешних рынков), либо частично управляются в рамках других направлений госполитики (благоустройство жилого фонда). Меры политики повышения энергоэффективности влияют в основном на вклад технологического фактора – снижение потребления энергии за счет вывода из эксплуатации старых энергоемких объектов, модернизации существующих на новой технологической основе и ввода новых энергоэффективных объектов.



Период	Всего	Экономическая активность	Структура на уровне секторов	Структура на уровне подсекторов	Технологический фактор	Климат (ГСОП)	Загрузка производственных мощностей	Благоустройство и обеспеченность
2016/2015	40182	15392	-1199	1615	16944	7813	-505	122
2017/2016	-8880	6260	1678	15384	-27015	-3483	-1249	-454
2018/2017	13814	-1135	-3485	23606	-8258	3979	-764	-130
2019/2018	-10659	-3389	826	18574	-13684	-12723	-482	217
2020/2019	-19137	1493	8535	-22567	-5654	-1623	520	157
2021/2020	61919	-445	-1816	46999	4025	14742	-1258	-329
2022/2021	-2769	22078	-10864	-18608	8980	-6493	935	1203
2022/2015	74469	40255	-6324	65004	-24661	2214	-2803	785

Рис. 5. Вклад отдельных факторов в изменение потребления энергии в 2015-2022 годах (по сумме секторов без неэнергетических нужд)

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Вклад технологического фактора определяется инвестиционными и операционными решениями пользователей энергии, и именно на него могут влиять меры госполитики. Часть этого вклада обеспечивается автономно, без влияния мер политики. В два этапа в России был налажен мониторинг вклада технологического фактора (Bashmakov and Myshak, 2014). Ее нынешний вариант формализован и запрограммирован ЦЭНЭФ-XXI как модель МТФК-16-80-ПГ, базирующаяся на методе декомпозиции LMDI. Методика утверждена приказом Минэкономразвития (МЭР РФ. 2019), а результаты ее применения ежегодно отражаются в *Государственном докладе о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации* (Госдоклад, 2022).

В 2015-2022 гг. вклад технологического фактора составил 25 млн тут. В 2016 г., 2021 г. и 2022 г. этот фактор не тормозил, а стимулировал рост энергопотребления (см. рис. 5). В 2022 г. за счет этого фактора прирост потребления энергии составил 9 млн тут. Диапазон неопределенности оценки его вклада составил от -7 млн тут до +10 млн тут. Он в основном определяется точностью оценок потребления жидкого топлива на автомобильном транспорте и потребления топлива в торговле. При альтернативной оценке потребления топлива на автомобильном транспорте на основе динамики парка автомобилей получается, что технологический фактор тормозил рост суммарного потребления энергии. Но даже при такой коррекции вклад технологического фактора в снижение потребления энергии не превышает 7 млн тут в 2022 г. При базовом расчете по данным Росстата получается, что за счет технологического фактора энергоемкость ВВП снижалась в 2015-2022 гг. на 2,4% (см. рис. 6).

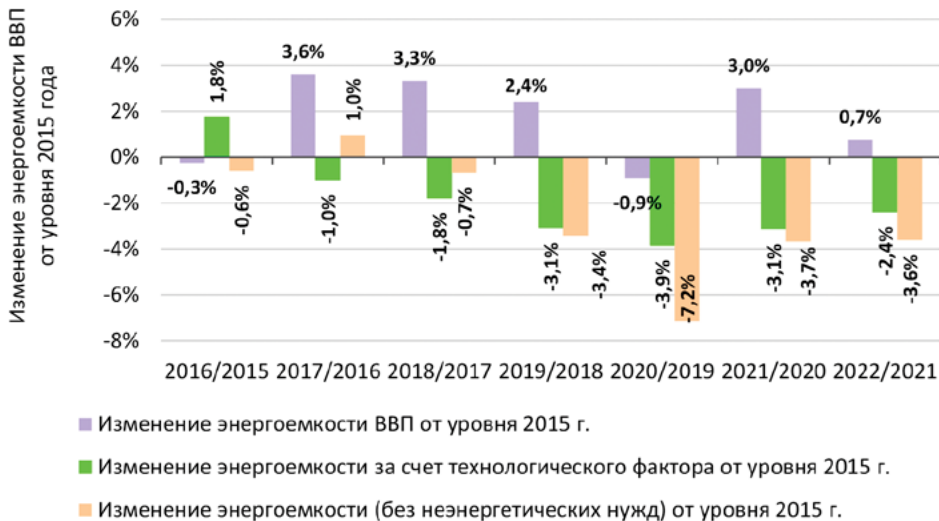


Рис. 6. Вклад технологического фактора в изменение энергоемкости ВВП

При коррекции получится 4%, или в среднем снижение на 0,6% в год. Тогда удвоение этого темпа дает 1,2% в год. Индекс энергоэффективности, отражающий динамику энергоемкости только за счет вклада технологического фактора, снижался в среднем на 0,4% в год. Тогда для удвоения нужно ускорить его снижение до 0,8% в год. Получается, что задача удвоить темпы повышения энергоэффективности для России – это обеспечение темпов снижения основных интегральных индикаторов энергоемкости не менее чем на 1% в год.

5. Россия может!

Россия может подписать Глобальное обязательство по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности (Global Renewables and Energy Efficiency Pledge) и взять на себя обязательства:

- Утроить глобальную мощность источников ВИЭ по централизованной и децентрализованной генерации электроэнергии без учета ГЭС мощностью свыше 25 МВт;

- Удвоить темпы повышения энергоэффективности - удвоить темпы снижения энергоемкости ВВП за счет вклада технологического фактора.

Для их реализации необходим ряд условий:

- обеспечение вводов мощностей позволяющих сократить и устранить разрывы Башмаков и др. 2023с):

- технологический разрыв – нехватка экономически доступных низкоуглеродных технологий с высоким уровнем технологической готовности на глобальных рынках;

- разрыв предложения – нехватка на российских рынках низкоуглеродных технологий, услуг по их установке и эксплуатации в масштабах, позволяющих двигаться по намеченным траекториям углеродной нейтральности;

- разрыв локализации – нехватка самостоятельно производимого оборудования для снижения технологической зависимости и рисков возникновения перебоев поставок импортного оборудования или рисков монопольного диктата цен на этих рынках доминирующими поставщиками, подобно тому, как это десятилетиями происходит на рынках ископаемого топлива.

- сформировать пять опор политики декарбонизации:

- технологии;

- нормативная база, включая стратегические и программные документы;

- финансы и экономические стимулы для их привлечения;

- институты для реализации намеченных мер политики;

- человеческий капитал, способный приводить все механизмы низкоуглеродной трансформации в движение в правильном направлении с желаемой скоростью (Башмаков и др. 2023а).

Эти задачи следует решать в рамках Национального мега-проекта по развитию ВИЭ и электротранспорта, и таких федеральных программах как «Активное строительство пассивных зданий» и «Глубокая и широкая реновация», «Декарбонизация промышленности».

Литература

1. Башмаков И.А. и др. (1992). Энергетика мира: уроки будущего / Под ред. И.А. Башмакова. М.: МТЭА, ИНЭИ РАН. С. 467.
2. Башмаков И.А. 2019. Повышение энергоэффективности и экономический рост. Вопросы экономики. 2019;(10):32-63. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-10-32-63>.
3. Башмаков И.А. 2022. Прогнозы развития энергетики мира 30 лет спустя: проверка прошлым уроков будущего. Вопросы экономики. 2022;(5):51-78. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-5-51-78>.
4. Башмаков И., В. Башмаков, К. Борисов, М. Дзедзичек, О. Лебедев, А. Лунин, А. Мышак. 2023а. Движение России к углеродной нейтральности: развилки на дорожных картах. <https://cenef-xxi.ru/articles/dvizhenie-rossii-k-uglerodnoj-nejtralnosti:-razvilki-na-dorozhnyh-kartah>.
5. Башмаков И., В. Башмаков, К. Борисов, М. Дзедзичек, О. Лебедев, А. Лунин, А. Мышак. 2023б. Низкоуглеродные технологии в России. Нынешний статус и перспективы. <https://cenef-xxi.ru/articles/nizkouglerodnye-tehnologii-v-rossii.-nyнешnij-status-i-perspektivy>.
6. Башмаков И.А., Мышак А.Д., Башмаков В.А., Башмаков В.И., Борисов К.Б., Дзедзичек М.Г., Лунин А.А., Лебедев О.В. (2023с) Оценка вклада технологического фактора в повышение энергоэффективности и в динамику выбросов ПГ в секторе «энергетика» России. Фундаментальная и прикладная климатология, т. 9, № 4, с. 403-431, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-403-431.
7. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2022 год. [Energy_efficiency_2023.pdf \(economy.gov.ru\)](https://www.economy.gov.ru/energy_efficiency_2023.pdf).
8. Жихарев А. 2024. Развитие ВИЭ-генерации в России: текущий статус и перспективы. АРВЭ. 16.02.2024.
9. IRENA (2023), Renewable capacity statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
10. МЭР РФ. 2019. Приказ Минэкономки России от 1 августа 2019 г. № 471 «Об утверждении методики расчета энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации и оценки вклада отдельных факторов в динамику энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации».
11. ЦЭНЭФ-XXI. 2021. Возобновляемые источники энергии – их место и роль в процессе трансформации энергетической промышленности России. Отчет для DENA; РЭА. 2022. Возобновляемая энергетика в России и мире.
12. Bashmakov I., A. Myshak, 2014. Russian energy efficiency accounting system. Energy Efficiency (2014) 7:743–759. DOI 10.1007/s12053-014-9252-z.
13. Bashmakov, I.A., L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fishedick, Y. Geng, K. Tanaka, 2022: Industry. In IPCC, 2022a: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

[P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.013; Delahaye R., M. Rensman, A. Walker. 2023. Structural changes in material flows from the mid-20th century in the Netherlands. Material use related to climate change. Statistics Netherlands. October 2023. [dutch_material_flows_from_1950.pdf](#).

14. Bashmakov I., A. Myshak, V.A. Bashmakov, V.I. Bashmakov, K. Borisov, M. Dzedzichuk, A. Lunin, O. Lebedev, and T. Shishkina (2023). Russian energy balance, energy efficiency, and energy-related GHG emission accounting system. *Energy Efficiency*. 16:67. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10132-6>.

15. BP. 2023. BP Energy Outlook 2050: January 2023.

16. Enerdata. 2023. World Energy & Climate Statistics – Yearbook. 2023.

17. Eurostat. European Union, 2024 Energy consumption decomposition analysis on EU-27 and EU-27 members. 2023 edition. Energy consumption decomposition analysis on EU27 and EU27 members ([europa.eu](#)).

18. Hardt L., A. Owen, P. Brockway, M.K. Heund, J. Barrett, P.G. Taylor, T.J. Foxon. 2018. Untangling the drivers of energy reduction in the UK productive sectors: Efficiency or offshoring? *Applied Energy*. Volume 223, 1 August 2018, pp. 124-133. Untangling the drivers of energy reduction in the UK productive sectors_ Efficiency or offshoring? ([sciencedirectassets.com](#)).

19. IRENA. 2022. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

20. IRENA. 2023. Renewable capacity statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Renewable Energy Capacity Statistics 2023 ([unreeea.org](#)).

21. IEA. 2023. World Energy Outlook. 2023.

22. ODYSSEE-MURE. United Kingdom | Energy profile, March 2021. Energy efficiency trends and policies. [united-kingdom-country-profile-english.pdf](#).

23. Riahi, K., R. Schaeffer, J. Arango, et al. (2022). Mitigation pathways compatible with long-term goals. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera; IEA. 2023. World Energy Outlook. 2023.].

24. UK ENERGY IN BRIEF 2023. <https://www.gov.uk/government/organisations/departments-for-energy-security-and-net-zero/about/statistics>.

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ КАРБОНОВЫХ ФЕРМ В ЦЕЛЯХ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА

А.А. Онучин*, И.М. Данилин, В.Е. Арясов

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
– обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
Красноярск
**onuchin@ksc.krasn.ru*

Аннотация. В качестве одной из разновидностей лесоклиматических проектов выделяются проекты по формированию карбоновых ферм. Анализируется возможность создания карбоновых ферм на основе высокопродуктивных сосновых древостоев посредством формирования насаждений оптимальной структуры на протяжении всего цикла функционирования лесоклиматического проекта. При этом эффект усиления углерод депонирующих функций насаждений начинает проявляться практически сразу после проведения лесохозяйственных мероприятий, а не спустя 10-15 лет, как в случае реализации проектов по облесению и лесоразведению. Создание карбоновых ферм посредством сосновых древостоев обеспечивает определенные преимущества по сравнению с таковыми на основе других быстрорастущих древесных пород, в том числе неофитов, высокая скорость поглощения которыми CO_2 не гарантирует надежного и длительного удержания в фитомассе растений депонированного углерода, прежде всего это касается многолетних трав. Посредством анализа экспериментальных данных по текущему приросту древесины в сосняках I класса бонитета различного возраста полноты и густоты, а также литературных и справочных данных, выявлены зависимости прироста сосняков от густоты и полноты. С использованием выявленных зависимостей оценена реакция прироста и величина депонирования CO_2 в насаждениях различной таксационной структуры. Для объективной оценки углерод депонирующих функций предлагаемых карбоновых ферм определены значения прироста, и соответственно депонирования углерода не только стволовой древесиной, но и другими фракциями фитомассы, включая хвою,

ветви и корни. Определены оптимальные значения густоты при максимально возможной полноте для насаждений каждой возрастной группы. Оценивая динамику прироста, представляется возможным планировать и проводить рубки ухода, направленные на усиление углерод депонирующих функций насаждений на каждом этапе роста формируемых карбоновых ферм. При этом наибольший эффект депонирования атмосферного углерода посредством формирования карбоновых ферм проявляется в возрасте от 20 до 60 лет, в период наиболее интенсивного роста сосновых древостоев, связанного с биологическими особенностями этой древесной породы.

Ключевые слова: лесное хозяйство, климатические изменения, углеродная нейтральность, лесоклиматические проекты

В условиях возрастающей обеспокоенности общества климатическими изменениями все большее внимание уделяется климаторегулирующей функции лесов (Швиденко, Щепашенко, 2014). Согласно выводам Межправительственной группы экспертов по изменению климата, причиной глобального потепления является беспрецедентное увеличение в атмосфере концентрации парниковых газов, вызванное антропогенной деятельностью человечества (Wallas-Wells, 2019; Carbon..., 2022; Climate..., 2022; AR6 Synthesis Report..., 2023). Одним из способов достижения углеродной нейтральности, наряду с сокращением выбросов парниковых газов, рассматривается возможность использования углерод депонирующего потенциала природных экосистем, в том числе лесов. Такой потенциал может быть реализован путем лесоразведения, охраны лесов от пожаров, защиты от вредителей и болезней, а также за счет усиления их углерод депонирующих способностей посредством лесохозяйственных мероприятий, в первую очередь посредством формирования так называемых карбоновых ферм.

Разработанный и апробированный в ИЛ СО РАН способ создания лесных карбоновых ферм позволяет осуществлять регулирование густоты и полноты насаждений посредством рубок ухода направленных на формирование структуры насаждений, обеспечивающей в каждом возрасте максимальный текущий прирост и, соответственно, депонирование атмосферного углерода (Онучин, Данилова, 2021; Онучин, Данилин, 2023).

Основным результатом предлагаемого способа формирования карбоновых ферм является возможность кратного повышения углерод депонирующей способности насаждений по сравнению с неуправляемыми лесами. Наибольшего эффекта при формировании лесных карбоновых ферм следует ожидать при проведении рубок ухода молодняках и средневозрастных древостоях естественного формирования (рис. 1). При формировании карбоновых ферм в сосновых насаждениях обеспечивается получение товарной древесины при рубках ухода на протяжении всего цикла функционирования проекта.

В условиях лесостепи и южной тайги максимального эффекта следует ожидать от реализации таких проектов на бывших сельскохозяйственных землях, за-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

росших сосновыми молодняками высокой густоты. Как правило, это земельные участки, расположенные в лучших лесорастительных условиях с хорошей транспортной доступностью и с большим потенциалом обеспечения ландшафтного разнообразия и сохранения редких и исчезающих видов растений и животных при грамотном размещении карбоновых ферм.

При формировании карбоновой фермы, в первый прием рубок удаляются деревья сопутствующих пород, угнетенные и усыхающие экземпляры. По мере роста насаждений меняется их структура (густота и полнота), которая начинает не соответствовать максимуму депонирования углерода, в данном возрасте. Тогда проводится второй прием рубок ухода. Вторым приемом, удаляются отстающие в росте деревья, и формируется структура насаждения, соответствующая максимальному депонированию углерода в данном возрасте. Проведение рубок допускается как посредством маневренной агрегатной техники, так и с помощью бензопил.



Рис. 1. Высокополнотный сосновый молодняк, перспективный для целей формирования карбоновой фермы

Сущность предлагаемого способа заключается в использовании структурно-возрастных оптимумов продуктивности сосновых древостоев, позволяющих посредством регулирования их густоты в каждом возрасте обеспечивать максимальный текущий прирост и соответственно депонирование атмосферного углерода. Максимальный эффект от применения способа следует ожидать в насаждениях с относительной полнотой не ниже 1,0.

Посредством анализа экспериментальных данных по текущему приросту древесины в сосняках первого класса бонитета различного возраста и структуры (густота, полнота), а также таблиц хода роста и литературных источников, выявлена зависимость текущего прироста от густоты и относительной полноты древостоев. Оптимальная структура насаждений определяется по формуле:

$$Pr = 0.8 * P * (1.51 - 0.012 * A + 0.000073 * A^2) * (0.865 + 0.645 * N - 0.033 * N^2 + 0.43 * A + 0.071 * A * N - (0.0044 + 0.0007 * N + 0.0002 * N^2) * A^2)$$

где: Pr – текущий прирост по общей продуктивности, м³ * га⁻¹ * год⁻¹; P – относительная полнота древостоя, в долях от единицы; N – число деревьев на одном гектаре; A – возраст древостоя, лет.

Графическое отображение зависимости, по которой определяется текущий прирост и соответственно депонирование атмосферного углерода при полноте 1,0 в соответствующем возрасте при различном количестве деревьев на одном гектаре, представлена на рис. 2.

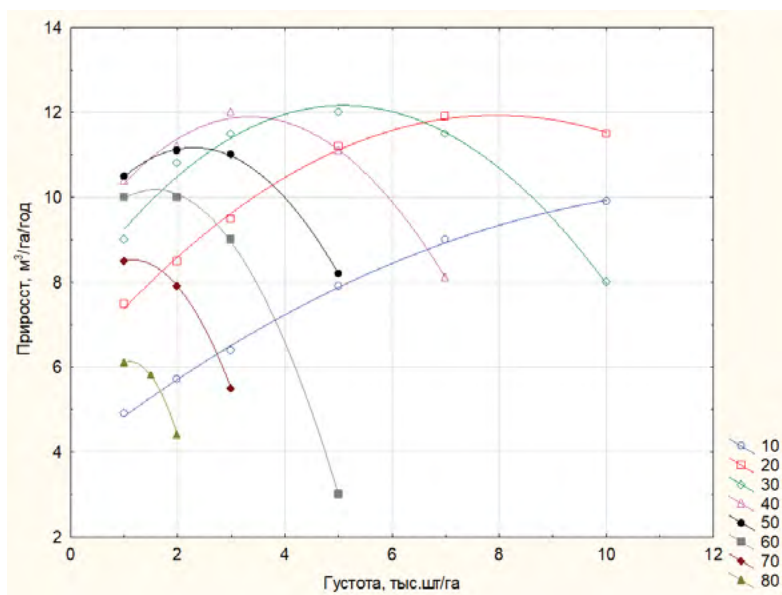


Рис. 2. Зависимость текущего прироста полных сосновых древостоев разного возраста (полнота 1,0) от густоты

При полноте древостоя выше 1,0 значения прироста определяются по формуле с учетом актуальной полноты древостоев, либо графические значения умножаются на значение относительной полноты древостоев (рис. 2).

Учитывая, что 1 м³ древостоя поглощает 0,75 т атмосферного CO₂, несложно оценить объемы поглощения CO₂ карбоновыми фермами при различных вариантах их формирования. Такие оценки позволяют определить оптимальный способ формирования карбоновых ферм с учетом актуальных лесохозяйственных

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

условий и цен за единицу углеродных тонн, а также оценить эффективность мероприятий по сравнению с вариантом неуправляемых лесов на ближайшую и отдаленную перспективу (рис. 3, 4).

Как свидетельствует анализ динамики поглощения атмосферного CO_2 насаждениями пройденными рубками ухода разной интенсивности углерод депонирующие функции древостоев реагируют на изреживание в первый же год после проведения рубок ухода. Для вариантов рубок высокой интенсивности, снижающих густоту древостоя до 1–2 тыс. шт./га, характерно снижение углерод депонирующих функций древостоев впервые годы после их проведения по сравнению с контролем, однако их пролонгирующий эффект наблюдается на десятки лет дольше по сравнению с рубками относительно низкой интенсивности.

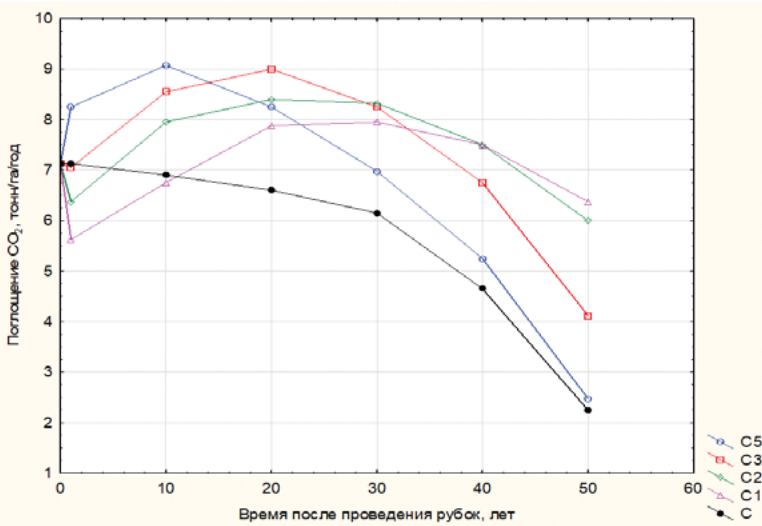


Рис. 3. Динамика поглощения CO_2 при различных вариантах изреживания 20-летнего сосняка с полной 1,0 и густотой 14 тыс. шт./га; C5 – густота снижена до 5 тыс. шт./га. C3, C2, C1 – соответственно до 3,2, и 1 тыс. шт./га; C – контроль (неуправляемые леса)

Несмотря на максимальный углерод депонирующий эффект в первые годы после проведения рубок ухода, снижающих густоту древостоя до 5 тыс. шт./га, он начинает относительно быстро снижаться и через 30 лет приближается к таковому у неуправляемых лесов (рис. 3).

С целью пролонгации углерод депонирующего эффекта карбоновых ферм целесообразно проведение повторных рубок ухода. Так при проведении через 20 лет повторных рубок в насаждении, густота которого в первый прием была снижена до 5 тыс. шт./га со снижением густоты до 2,5 тыс. шт./га, обеспечивает дополнительный кумулятивный эффект по сравнению с любым из вариантов одно приемных рубок ухода (рис. 4).

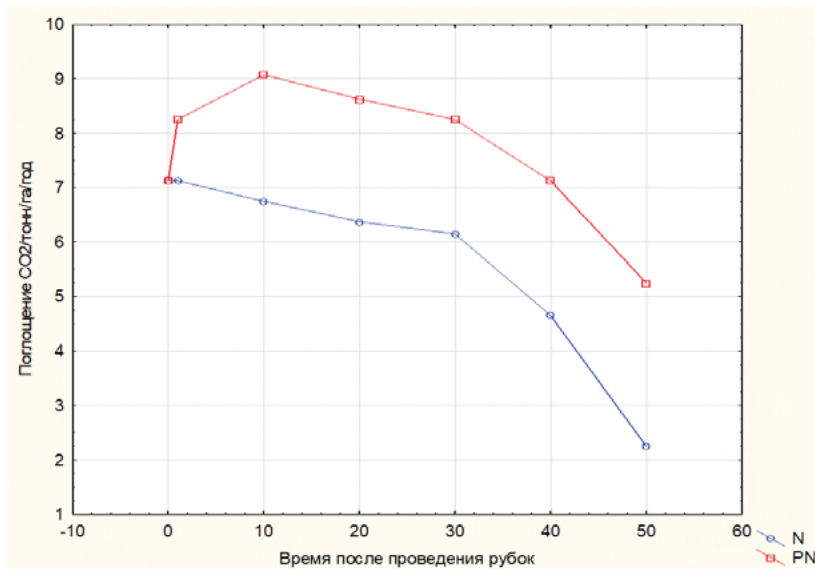


Рис. 4. Динамика поглощения CO₂ при проведении двух приемной рубки ухода, в первый прием густота снижена до 5 тыс. шт./га. и во второй прием через 20 лет густота снижена до 2,5 тыс. шт./га (PN); N – контроль (неуправляемые леса)

Таким образом, формирование карбоновых ферм в высокополнотных сосновых молодняках посредством различных вариантов изреживания позволит увеличить углероддепонирующий эффект насаждений. По сравнению с неуправляемыми лесами такие фермы только за счет прироста древесины способны ежегодно обеспечить в среднем до 2,16 т/га дополнительного поглощения CO₂ в течение последующих 50 лет с начала функционирования климатического проекта. Наибольшего эффекта следует ожидать от двух приемного варианта изреживания (2,16 т/га). Одноприемные варианты в зависимости от интенсивности изреживания обеспечивают следующие величины поглощения за 50-летний период функционирования проекта. Изреживание до 5 тыс. шт./га обеспечит ежегодное дополнительное поглощение в 1,11 т/га, а до 3, 2 и 1 тыс. шт./га, соответственно 1,69, 1,82 и 1,53 т/га ежегодно.

Учитывая, что депонирование атмосферного углерода в процессе роста сосновых насаждений происходит не только в древесине, где углерод депонируется на длительный период, но и в других фракциях фитомассы включая корни, ветви и хвою, безусловный интерес представляет информация о приросте этих фракций и депонированию углерода насаждениями в целом. Имея данные о динамике прироста древесины в сосновых насаждениях (Онучин, Данилин, 2023), при наличии соответствующих конверсионных коэффициентов, отражающих соотношение прироста массы различных фракций нетрудно оценить общую величину прироста древостоя и соответственно величину депонирования углерода. В литературе достаточно много данных о структуре фитомассы, в том

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

числе сосновых древостоев (Онучин, Борисов, 1984; Усольцев, 2007.) однако соотношение различных фракций фитомассы не соответствует соотношению их приростов, поскольку продолжительность жизни различных частей дерева не одинакова. К сожалению, в литературе не так много данных позволяющих оценить структуру прироста общей фитомассы всего древостоя включая корни, ветви, хвою и древесину.

Исследования прироста различных фракций фитомассы проводились в сосновых молодняках Красноярской лесостепи. Характеристика объектов дана в ранее опубликованной работе (Онучин и др., 2022). Как показали результаты специальных исследований в общее депонирование углерода сосновыми молодняками существенный вклад вносят прирост хвои, корней и ветвей. На долю стволов приходится от 60 до 65 % прироста общей массы древостоев, а на долю хвои, ветвей и корней соответственно 12-18, 10-15 и 8-12 % общего прироста фитомассы древостоя соответственно. Очевидно, что в такой же пропорции будет наблюдаться и поглощение атмосферного CO_2 этими фракциями фитомассы. Следовательно, для расчета поглощения атмосферного CO_2 древостоем в целом, необходимо учитывать вклад прироста всех частей деревьев. Таким образом применяя усредненные конверсионные коэффициенты, представляется возможным посредством использования данных по приросту древесины (рис. 2) оценить поглощения атмосферного CO_2 древостоем в целом.

На рис. 5 представлена концептуальная схема модели интенсивного использования и воспроизводства лесов, в рамках которой целесообразно, в том числе и формирование карбоновых ферм.

Предлагаемый способ позволяет посредством рубок сформировать таксационную структуру древостоев, обеспечивающую наибольший прирост и соответственно максимальное депонирование атмосферного углерода в соответствующем возрасте. Предложенный способ позволяет усиливать углерод депонирующие функции сосновых насаждений и обеспечить максимальный эффект депонирования углерода на каждом этапе роста формируемых карбоновых ферм.

Наибольший эффект депонирования атмосферного углерода посредством формирования карбоновых ферм проявляется в возрасте от 20 до 60 лет, в период наиболее интенсивного роста сосновых древостоев, связанного с биологическими особенностями этого вида древесных растений.

Поэтапный много приемный подход в формировании карбоновых ферм позволяет достигать максимальных показателей депонирования углерода, однако принятие решения относительно вариантов формирования карбоновых ферм должно приниматься с учетом актуальных рыночных цен на углеродные тонны и затрат на проведение лесохозяйственных мероприятий в тех или иных регионах.

Предлагаемый способ формирования лесных карбоновых ферм будет содействовать получению новых знаний и выявлению закономерностей структурно-функциональной организации, биологической продуктивности и углерод депонирующих функций лесных экосистем, окажет существенное воздействие на развитие различных смежных областей науки и новых технологий.



Рис. 5. Модель высокоинтенсивного использования и воспроизводства лесов

Результаты применения способа в практической сфере послужат основой для развития новой методологии лесовыращивания, формирования лесных экосистем высокого природоресурсного и природоохранного содержания, имеют высокую потенциальную коммерческую ценность на российском и международных лесных рынках.

Работа выполнена в рамках государственного задания №FWES-2024-0040 и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

1. Онучин А.А., Борисов А.Н. Опыт таксации фитомассы сосновых древостоев // Лесоведение. 1984. № 6. С. 66-71.
2. Онучин А.А., Данилин И.М. Способ формирования карбоновых ферм // Патент РФ на изобретение № 2807337. М.: Роспатент, 2023.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

3. Онучин А.А., Данилова И.В. Технология формирования карбоновых полигонов с высокими углероддепо-нирующими функциями // Наука и технологии. Экология и климат. 2021. № 1. С. 50-52.

4. Онучин А.А., Петренко А.Е., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Реакция сосновых молодняков Красноярской лесостепи на изреживание и внесение азотных удобрений // Сибирский лесной журнал. 2022. № 3. С. 6-14.

5. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: Методы, база данных и ее приложение. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.

6. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.

7. AR6 Synthesis Report Climate Change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>

8. Carbon sequestration leadership forum. Project summaries, 2022. <https://www.cslforum.org/cslf/>

9. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V. et al. (Eds.); Cambridge Univ. Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA. 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

10. Wallas-Wells D. The uninhabitable Earth: Life after warming. New York, USA: Tim Duggan Books, 2019, 320 p.

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

А.В. Ольчев^{1,2*}, С.К. Гулев²

¹Географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

**aoltche@yandex.ru*

Аннотация. Для мониторинга потоков парниковых газов в природных экосистемах, а также для отработки технологических решений по снижению их эмиссии и увеличению их поглощения из атмосферы, Министерством науки и высшего образования Российской Федерации инициировано создание в России сети карбоновых полигонов. Пилотный проект является важной частью стратегии низкоуглеродного развития по декарбонизации российской экономики, ее адаптации к глобальному энергопереходу, сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу и достижению углеродной нейтральности России к 2060 году. Для достижения поставленных задач в пилотном проекте используется комплексный подход, включающий наземные измерения потоков парниковых газов и углеродного баланса, данные дистанционного зондирования, и методы математического моделирования. Для проведения мониторинговых наблюдений за потоками парниковых газов применяется широкий спектр экспериментальных подходов для их прямого и косвенного определения. Среди прямых методов измерения потоков в полевых условиях используются методы турбулентных пульсаций (eddy covariance) и экспозиционных камер. Карбоновые полигоны для мониторинга потоков парниковых газов планируется создать в наиболее репрезентативных природных наземных и водных типах экосистем. Получаемые экспериментальные данные по потокам на полигонах позволяют оценить масштабы пространственной и временной изменчивости эмиссии и поглощения парниковых газов на территории Российской Федерации, и получить более точные оценки потоков парниковых газов на региональном и национальном уровне.

Ключевые слова: изменения климата, парниковые газы, карбоновые полигоны, стратегия низкоуглеродного развития, природные экосистемы

Современные изменения климата: основные тенденции и закономерности

Климат на Земле постоянно меняется под влиянием различных внешних и внутренних факторов. История развития Земли знала периоды значительного роста глобальной температуры, а также ее продолжительного снижения, когда значительные территории поверхности земли покрывались мощным ледниковым покровом (Jouzel et al., 2007). Отличительной особенностью современных изменений климата является наблюдаемый в течение последних десятилетий беспрецедентный рост глобальной температуры. По данным итогового доклада международной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2022), средний рост глобальной температуры в настоящее время по сравнению с доиндустриальным периодом (1850-1900 гг.) составил около 1.1°C , а средняя глобальная температура на Земле достигла 14.8°C . При этом только за период с 2010 по 2020 год рост средней глобальной температуры составил 0.25°C . Эти темпы роста являются максимальными за весь период инструментальных метеорологических наблюдений. Наиболее высокие темпы роста температуры отмечаются над поверхностью суши в умеренных и полярных широтах. Одновременно с ростом температуры отмечается и изменение количества выпадающих атмосферных осадков, а также увеличение повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений (волн жары, почвенных засух, ураганов, смерчей, экстремально сильных ливневых осадков, приводящих к катастрофическим наводнениям). Очевидно, что все подобные экстремальные явления оказывают крайне неблагоприятное влияние на условия жизни населения, а также могут привести к значительному экономическому ущербу в различных отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве.

Большинство экспертов по изменению климата связывают наблюдаемые в последние десятилетия резкие климатические изменения с резким увеличением содержания парниковых (климатически активных) газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, гексофторида серы, фреонов и др.) в атмосфере, прежде всего из-за стремительного роста их выбросов от антропогенных источников (Forster et al 2023). Так, согласно данным палеоклиматических исследований, современный уровень содержания диоксида углерода в атмосфере достиг максимальных значений за последние 800 тысяч лет, составив в январе 2024 года 422.16 ppm (parts per million или частей на миллион, соответствующих количеству cm^3 диоксида углерода в 1m^3 сухого воздуха). Только начиная с доиндустриальной эпохи содержание парниковых газов, имеющих как естественные, так и антропогенные источники увеличилось для: диоксида углерода на 46%, метана на 157% и закиси азота на 22%. Парниковый эффект играет в жизни нашей планеты очень важную роль. Он формирует комфортный для жизни человека тепловой баланс атмосферы и земной поверхности, а также защищает Землю от резких колебаний температуры в дневном и годовом цикле. Без парниковых газов жизнь на планете Земля была бы невозможной. Именно с резким снижением содержания парни-

ковых газов в атмосфере некоторыми учеными (например, шведским химиком и физиком, лауреатом Нобелевской премии Сванте Аррениусом) связывалось возникновение ледниковых периодов в прошлые эпохи. Однако, в настоящее время, на фоне резкого роста содержания парниковых газов в атмосфере, происходит достаточно интенсивный нагрев земной поверхности, превышающий темпы роста температуры в историческом прошлом, что приводит также и к перестройке глобальных и региональных атмосферных процессов. Быстрое изменение климатических условий, очевидно, может оказать сильное влияние на условия жизни человека, рост и развитие растений и животных на суше и в океане, сельское хозяйство и промышленность (IPCC 2022).

Прогностические оценки возможных будущих изменений климата показывают, что практически при всех возможных сценариях будущих климатических изменений, таких как сценарии социально-экономических изменений (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) и прогнозируемых в рамках этих сценариев, увеличении выбросов парниковых газов, современные темпы глобального потепления будут сохраняться на протяжении всего 21-го столетия (Riahi et al. 2017, IPCC 2022). При этом на территории России, а также и в других странах и регионах, расположенных в умеренных и полярных широтах, будут отмечаться наиболее высокие темпы роста температуры по сравнению с прогнозируемыми средними значениями температурных изменений по всему земному шару. На фоне роста температуры в южных районах России прогнозируется и снижение количества осадков и усиление засухливости, что может иметь крайне негативные последствия для экономики и жизни населения.

С учетом выявленных закономерностей климатических изменений и анализа причинно-следственных связей можно с уверенностью полагать, что сокращение антропогенных выбросов парниковых газов и сдерживание темпов их роста в атмосфере является одной из важнейших современных мировых проблем. Это возможно осуществить, прежде всего, за счет развития низкоуглеродных технологий производства энергии, а также технологий, обеспечивающих частичный или полный отказ в будущем от потребления энергии, вырабатываемой за счет углеводородов, в ключевых областях экономики, таких как энергетика, металлургия, машиностроение и транспорт. Этот путь предполагает огромные финансовые затраты, на которые мировое сообщество, тем не менее, будет вынуждено пойти для достижения углеродной нейтральности к 2050-2060 гг. При этом, осуществление амбициозных проектов в области низкоуглеродного развития, их масштабы и скорость, с которой они должны реализовываться, существенно зависят от потенциала естественного поглощения климатически активных (парниковых) газов природными экосистемами. Даже при наиболее жестком сценарии сокращения выбросов парниковых газов, современные природные экосистемы суши и океана к 2100 году не смогут полностью скомпенсировать поступление парниковых газов в атмосферу от антропогенных источников. Этот «излишек» парниковых газов может быть выведен из атмосферы с использованием низкоуглеродных технологий. Однако введение и реализация подобных мероприятий

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

может потребовать существенной перестройки многих отраслей экономики, с учетом уже имеющихся существенных ограничений потенциала многих низкоуглеродных технологий. С учетом выявленных закономерностей видится перспективным более широкое использование возможностей естественных экосистем для увеличения поглощения климатически активных газов, поскольку их использование является менее затратным по сравнению с другими технологиями низкоуглеродного развития. Другими словами, учет роли естественных экосистем в формировании баланса парниковых газов в атмосфере является ключевым для прогнозирования социально-экономического развития страны в условиях меняющегося климата.

Природные экосистемы, обладают значительным потенциалом регулирования атмосферного баланса парниковых газов, прежде всего, за счет способности растительности к поглощению диоксида углерода из атмосферы и его секвестрации в почвенном покрове. Поглощая парниковые газы из атмосферы, природные экосистемы служат также и достаточно мощным их источником. Это предполагает необходимость получения точных количественных данных о потоках парниковых газов в природных экосистемах, что позволит не только оценить их роль в регулировании баланса парниковых газов в атмосфере, но также и предложить новые технологии, позволяющие уменьшить эмиссию и интенсифицировать поглощение парниковых газов наземными и водными экосистемами.

Важно отметить, что рассматривая парниковые газы в качестве основного драйвера современного глобального потепления необходимо учитывать, что кроме антропогенных парниковых газов, на климат оказывает влияние еще целый комплекс природных и антропогенных факторов, определяющих радиационный, тепловой и водный обмен земной поверхности с атмосферой (Lawrence et al. 2022). Изменение альбедо (отражательной способности) поверхности может в отдельно взятой экосистеме существенно (на несколько градусов) изменить ее среднемесячную или среднегодовую температуру в сторону как ее увеличения, так и ее уменьшения. Водяной пар, являясь основным парниковым газом в атмосфере, и поступающий в атмосферу как за счет испарения влаги с поверхности пресноводных водоемов, морей, океанов, так и за счет транспирации наземных растений и испарения с поверхности почвы, также может привести к существенным как положительным, так и отрицательным температурным изменениям в региональном и глобальном масштабе. Охлаждающий эффект водного пара связан с образованием облачности, экранирующей поступление солнечной радиации к земной поверхности. Важную роль в формировании климата, и температурного режима оказывают аэрозоли. Проведенные модельные оценки для Центральной и Восточной Сибири показали, что выброс аэрозолей и продуктов горения при лесных пожарах в летнее время может привести к снижению среднесуточных температур в Сибири на 2-3°C, а также к уменьшению выпадающих конвективных атмосферных осадков в регионе на 30-60% (Kirsanov et al 2020). Таким образом, при выборе стратегии по смягчению последствий современных климатических изменений очень важно

не ограничиваться рассмотрением влияния на климат только ключевых антропогенных парниковых газов, таких как диоксид углерода, а рассматривать весь комплекс внешних и внутренних факторов (радиационный, тепловой водный, углеродный балансы земной поверхности), и учитывать сложную систему прямых и обратных связей, возникающих между подстилающей поверхностью и климатической системой.

Стратегия низкоуглеродного развития Российской Федерации и карбоновые полигоны

Исследования потоков парниковых газов в природных экосистемах, начали активно развиваться с начала 90 годов прошлого века. Значительный стимул подобным исследованиям дали государственные программы поддержки подобных исследований в США и Западной Европе. Создаваемые станции наблюдений за потоками парниковых газов использовались не только для исследований временной и пространственной изменчивости потоков парниковых газов в наземных экосистемах, но и для поддержки спутниковой программы НАСА (Earth Observing System, EOS). Для интеграции деятельности и обобщения имеющихся данных наблюдений в это же время начали создаваться региональные и глобальные сети станций наблюдений за потоками парниковых газов. В настоящее время, современные региональные и глобальные сети станций наблюдений за потоками (например, FLUXNET) насчитывают более 1000 станций (Papale 2020). Число постоянно действующих станций мониторинга потоков парниковых газов на территории России, до недавнего времени насчитывало не более 20 постоянно действующих станций. Ключевым условиям деятельности подобных станций является стандартизированные технологии наблюдений, используемое оборудование, и методы обработки данных, позволяющих обеспечить получение достоверных и сопоставимых данных наблюдений за потоками парниковых газов (Куричева и др. 2023).

Предложенная Правительством Российской Федерации система мер в рамках программы декарбонизации рассматривает проведение широкого спектра мероприятий по реализации стратегии низкоуглеродного развития, направленных не только на принятие мер по уменьшению антропогенных выбросов диоксида углерода и других парниковых газов, но также и на проведение мероприятий по сохранению и увеличению поглотительной способности парниковых газов лесными, болотными и иными наземными и водными экосистемами.

В качестве одной из главных задач Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021 - 2030 годы планируется создание национальной системы мониторинга потоков парниковых (климатически активных) газов и веществ для обеспечения получения на национальном уровне надежной и репрезентативной информации о потенциале наземных и водных экосистем к поглощению парниковых газов.

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Учитывая это, в 2021 году Министерство науки и высшего образования Российской Федерации начало реализовывать пилотный проект по созданию сети научно-исследовательских и образовательных полигонов для разработки, испытания и валидации технологий количественной оценки потенциалов эмиссии и поглощения парниковых газов различными типами природных экосистем. Это стало ответом научного сообщества России на вызовы, связанные с необходимостью реализации Парижского Соглашения, которое было принято 196 странами и вступило в силу 4 ноября 2016 г.

Перед пилотным проектом была поставлена стратегическая цель – оценить потенциал российских экосистем в части обеспечения поглощения климатически активных газов. Это принципиально важно для международной отчетности, оценки потенциала различных типов ландшафтов в части поглощения парниковых газов и апробации секвестрационных технологий, наиболее эффективных в различных ландшафтных условиях.

Карбоновый полигон это один или несколько участков земной поверхности с репрезентативными для данной территории рельефом, растительным и почвенным покровом, созданные для реализации мероприятий по определению потоков парниковых газов, а также по развитию технологий их контроля в природных экосистемах.

Основными задачами карбоновых полигонов являются:

- Мониторинговые наблюдения за эмиссией и поглощением парниковых газов в природных экосистемах посредством наземных и дистанционных методов измерений. Оценка пространственной и временной изменчивости потоков парниковых газов.
- Развитие и отработка технологических решений контроля эмиссии и поглощения парниковых газов природными экосистемами, направленных на уменьшение их эмиссии и увеличения их поглощения из атмосферы.
- Разработка и адаптация технологий дистанционного мониторинга структуры и состояния растительного и почвенного покрова, эмиссии и поглощения парниковых газов.
- Подготовка кадров высшей квалификации в области методов экологического контроля и мониторинга потоков парниковых газов, перспективных низкоуглеродных технологий.

Мониторинговые наблюдения за эмиссией и поглощением парниковых газов в природных экосистемах

Для достижения поставленных задач в пилотном проекте по карбоновым полигонам планируется использование комплексного подхода, включающего создание разветвленной системы станций наземного мониторинга потоков парниковых газов и составляющих углеродного баланса, развитие методов и технологий для определения приземных потоков парниковых газов с применением средств дис-

танционного зондирования, а также математическое моделирование процессов переноса парниковых газов между земной (водной) поверхностью и атмосферой в различных пространственных и временных масштабах (Рисунок 1). Блок дистанционного зондирования включает спутниковое и самолетное зондирование, а также зондирование с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Интерпретация дистанционных данных будет проводиться при широком использовании математических моделей и данных наземных мониторинговых наблюдений за потоками парниковых газов. Предлагаемый комплексный подход позволит получить надежные оценки потоков парниковых газов в наземных и водных экосистемах в различных пространственных и временных масштабах, а также оценить масштабы пространственно-временной изменчивости эмиссии и поглощения парниковых газов наземными (тундра, леса, лесостепь, степь, луга, сельскохозяйственные посевы, болота) и водными экосистемами (прибрежные акватории морей и пресноводные внутренние водоемы), включая территории с многолетней мерзлотой. Долговременное проведение мониторинговых наблюдений позволит также и количественно оценить неопределенности в интегральных оценках потоков парниковых газов как для всей территории России, так и для отдельных типов природных ландшафтов.

Для проведения мониторинговых наблюдений за потоками парниковых газов используется широкий спектр экспериментальных подходов для прямого и косвенного определения потоков парниковых газов и составляющих углеродного баланса.

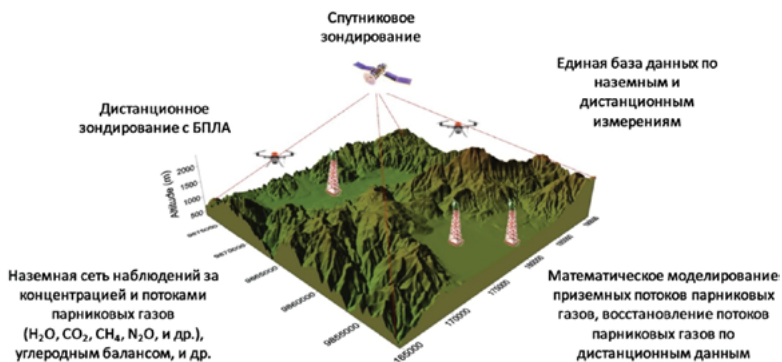


Рис. 1. Общая схема организации дистанционных и наземных измерений потоков парниковых газов на карбоновых полигонах

Среди прямых методов измерения потоков в полевых условиях были выбраны методы турбулентных пульсаций (eddy covariance) и экспозиционных камер, которые в настоящее время являются наиболее методически разработанными и точными технологиями для мониторинговых измерений за потоками парниковых газов (Aubinet et al. 2012). Для определения составляющих углеродного баланса используются данные о динамике запасов органического и неорганического углерода в растительности, почве и воде. Для адекватной интерпретации

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

пространственной и временной изменчивости измеряемых потоков на карбоновых полигонах проводятся также и комплексные метеорологические, экофизиологические, ландшафтные, геоботанические и почвенные исследования.

Использование спектрозональной измерительной аппаратуры, лидаров и портативных газоанализаторов, установленных на беспилотных летательных аппаратах, а также широкий спектр информации, поступающей с искусственных спутников, позволит оценить как состояние и свойства подстилающей поверхности, так и содержание парниковых газов в нижней тропосфере. На следующем шаге, результаты, полученные дистанционными методами, совместно с данными наземных измерений концентраций и потоков парниковых газов могут быть использованы для надежных региональных оценок эмиссии и поглощения парниковых газов природными экосистемами. Существенная роль в проведении подобных оценок будет принадлежать математическим моделям земной системы. Именно комплексный подход, основанный на использовании дистанционной и наземной информации, может служить основой для объективного мониторинга потоков парниковых газов с высоким пространственным и временным разрешением в региональном и национальном масштабе.

Карбоновые полигоны для мониторинга потоков парниковых газов планируется распределить в наиболее репрезентативных природных наземных и водных экосистемах, позволяющих оценить масштабы пространственной и временной изменчивости эмиссии и поглощения парниковых газов на территории Российской Федерации с учетом существующего разнообразия и изменчивости климатических условий, структуры землепользования, растительного и почвенного покрова, рельефа местности (рис. 2).



Рис. 2. Карта экорегионов для выбора полигонов для проведения исследований за потоками парниковых газов и углеродного баланса наземных экосистем Российской Федерации (выполнена А. Максаковым, ИО РАН)

Современная стратегия развития сетей мониторинга предполагает выделение наиболее репрезентативных ключевых регионов (экорегiónов), сходных по структуре землепользования, типу растительного покрова, климатическим и почвенным условиям, обладающих сходными закономерностями в контексте их влияния на углеродный баланс земной поверхности и потоки парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой. Это обеспечит:

- научный подход к выбору территорий для размещения полигонов с целью достижения максимального покрытия территории и максимального отражения существующего разнообразия растительного и почвенного покрова, климатических условий;
- систематизацию и интегрирование экспериментальных данных, собираемых на карбоновых полигонах, включая данные дистанционного зондирования земной поверхности со спутников;
- обеспечение интеграции исследований на карбоновых полигонах с региональным и глобальным моделированием углеродного цикла.

В настоящее время в России успешно функционирует 18 карбоновых полигонов, расположенных в: Калининградской, Калужской, Кировской, Новосибирской, Московской, Тюменской, Свердловской, Сахалинской и Самарской областях, Краснодарском крае, Чеченской республике, республике Татарстан, республике Башкортостан, Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах. Операторами полигонов выступают ведущие университеты и научно-исследовательские институты Российской Федерации.

Развитие и отработка на практике технологических решений контроля эмиссии и поглощения парниковых газов природными экосистемами

Среди ключевых задач деятельности карбоновых полигонов, кроме регулярных наблюдений за потоками парниковых газов, важная роль уделяется развитию и отработке на практике технологических решений контроля эмиссии и поглощения парниковых газов природными экосистемами. Данные решения направлены на реализацию мероприятий по уменьшению эмиссии парниковых газов природными экосистемами и на увеличение их поглотительной способности. Среди возможных подходов к решению данной задачи рассматриваются различные виды деятельности и технологии, включающие:

- лесовосстановление, рациональное использование лесных ресурсов;
- выращивание высокопродуктивных насаждений (например, павлонии, мискантуса, тополя, и др.);
- восстановление антропогенно-нарушенных земель;
- регенеративное сельское хозяйство и животноводство, точное земледелие, технологии нулевой обработки почвы (no-till), и др.;

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

- обводнение торфяников, восстановление водно-болотных угодий;
- охрана морской среды, возделывание, разведение, выращивание полезных морских водорослей, беспозвоночных, рыб, и др.

Выбор отдельных технологий, обуславливается как общегеографическими (климатическими, ландшафтными, почвенными) условиями региона, так и экономическими факторами. При организации подобной деятельности необходимо учитывать наличие необходимой экспериментальной базы и оборудования для проведения подобных исследований, наличие научных и производственных кадров у оператора, индустриального и технологического партнера карбонового полигона, имеющегося опыта реализации научных и бизнес проектов по исследованию углеродного баланса и потоков парниковых газов. Данные условия являются надежной гарантией достижения максимальных показателей эффективности при реализации задач декарбонизации и достижения углеродной нейтральности.

При реализации мероприятий по развитию и отработке технологических решений контроля эмиссии и поглощения парниковых газов важно привлечение широкого круга специалистов работающих в различных научных областях, включая экологию, экономику, биологию, метеорологию, почвоведение, океанологию, агрономию, а также многие другие научные направления.

В частности при выращивании высокопродуктивных насаждений рекомендуется сделать акцент на выращивание аборигенных виды растений, которые как принято считать наиболее приспособлены к местным природно-климатическим условиям. При выращивании инвазивных чужеродных видов надо учитывать возможные риски для биоразнообразия местной флоры и фауны. При реализации лесо-климатических проектов важно адекватно проводить выбор базовой линии, относительно которой проводятся оценки эффективности лесоклиматического проекта. В частности, необходимо учитывать, что если некоторая ненарушенная лесная экосистема (даже в случае старовозрастных лесов) служит стоком диоксида углерода из атмосферы, то после проведения сплошной рубки и лесовосстановительных мероприятий, восстанавливаемая лесная экосистема будет служить источником диоксида углерода для атмосферы на протяжении долгих 5-20 лет в зависимости от местных климатических и ландшафтных условий, а также видового состава и ростового потенциала саженцев (Amiro et al. 2010). К сожалению, при расчете эффективности лесоклиматических проектов до настоящего времени не учитывается реальный потенциал воздействия проведенных мероприятий на климатическую систему. Обычно в подобных проектах учитываются лишь изменения запасов углерода в почве и растительности без реального объективного контроля потоков парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой. Кроме того, в подобных проектах никогда не учитываются изменения, например, радиационного, теплового и водного режима исследуемой экосистемы (Lawtence et al. 2023). А ведь в масштабах экосистемы подобные мероприятия (например, сплошная вырубка) могут привести к существенному изменению температуры приземного слоя воздуха на исследуемых участках (на несколько градусов, как в

сторону увеличения, так и уменьшения). Огромное количество вопросов может возникнуть и при реализации проектов, направленных на вторичное обводнение торфяников и выращивание микро- и макроводорослей в шельфовой зоне. Выполнение подобных проектов требует всестороннего анализа всей совокупности факторов, влияющих на потоки парниковых газов, как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективе.

Образовательная деятельность

Будучи научно-образовательными структурами, полигоны также служат созданию нового уровня кадрового потенциала для развития и поддержания системы мониторинга климата. Это потребовало адаптации существующих и разработки новых программ, консолидирующих знания из разных областей. Сегодня в образовательных и научных организациях, являющихся операторами полигонов, успешно реализуются многочисленные образовательные программы, как для бакалавриата, так и для магистратуры. Кроме того, на многих полигонах развиваются программы дополнительного образования по тематике климатических исследований и контроля за потоками парниковых газов. Общее количество программ и обучающих курсов приближается к сотне.

Большая часть разрабатываемых программ относится к направлениям экологии, гидрометеорологии, биологии и экономики. Важным является то, что уже сейчас разрабатываются и внедряются программы в области инженерных наук, а также метрологии и стандартизации, принципиально важные для обеспечения качества проводимых измерений на полигонах. По уровню образования преобладают программы дополнительного образования и магистратуры. Все участники пилотного проекта участвуют в организации и проведении региональных семинаров и конференций различного формата, а также мастер-классов и мероприятий для школьников.

Перспективы участия в проекте коммерческих организаций

Для поддержания успешной деятельности карбонового полигона к его работе широко привлекаются индустриальные и технологические партнеры. Интерес для участия в этом пилотном проекте индустриальных партнеров определяется возможностью для них получить статус соответствия углеродной нейтральности, а также связанные с этими определенными экономические и юридические преференции. Условный производитель может вкладываться в снижение выбросов парниковых газов или инвестировать в различные компенсационные мероприятия, что на практике считается равнозначным в плане достижения баланса. Выбор компенсационных мер достаточно широк и может включать как инвестиции в возобновляемые источники энергии, энерго-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

эффективность, покупку углеродных квот и углеродных кредитов, так и участие в компенсационных программах по реализации климатических проектов, научная основа которых будет разработана в ходе деятельности карбоновых полигонов (лесовосстановление, рекультивация нарушенных земель, и другие мероприятия по созданию условий для увеличения поглощения и снижения эмиссии климатически активных газов природными экосистемами). Выбор возможных действий определяется экономической стратегией развития отдельно взятых предприятий и территорий. Таким образом, развитие сети карбоновых полигонов может иметь существенное значение не только для исследовательских организаций, работающих над проблемами изменения климата, но также и для промышленных предприятий и сельского хозяйства.

Характеризуя роль карбоновых полигонов в реализации стратегии низкоуглеродного развития страны, важно отметить, что применение современных методов исследований и технологий, соответствующих современным международным стандартам, позволит получить надежные и репрезентативные данные об эмиссии и поглощении парниковых газов природными наземными и водными экосистемами, развить новые технологии для рационального использования и сохранения природных ресурсов, уменьшить негативные последствия роста антропогенной эмиссии на климат, и приблизится к достижению стратегической государственной задачи по достижению Российской Федерацией климатической нейтральности к 2060 году.

Оглядываясь на прошедшие три года реализации пилотного проекта, можно с уверенностью сказать, что он не просто успешно развивается, а стал одним из определяющих в области климатических исследований в России. Начиная с 2022 года, пилотный проект находится в тесном сотрудничестве с Государственным проектом создания «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ», в рамках которого будет создана многоуровневая система мониторинга парниковых газов, включающая как прямые, так и спутниковые наблюдения над сушей и над океаном и морями, а также системы моделирования и интегрирования данных. Проект карбоновых полигонов без сомнения станет важнейшим компонентом национальной системы, обеспечивая высокоточные наблюдения потоков климатически активных газов и характеристик углеродного цикла на репрезентативных площадках интенсивного мониторинга, без чего невозможно получение достоверных оценок углеродного баланса для различных экосистем Российской Федерации.

Литература

1. Куричева О.А., Авиллов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. №87(4). С. 512–535. DOI:10.31857/S2587556623040052.

2. Amiro, B.D., Barr, A.G., Barr, J.G., Black, T.A., Bracho, R., et al. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *J. Geophys. Res.* 2010. 115, G00K02
3. Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer, Dordrecht, The Netherlands. 2012. P. 438
4. Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., et al.: Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data*, 2023. Vol. 15, P. 2295–2327, DOI:10.5194/essd-15-2295-2023
5. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 2022. 3056 p. DOI:10.1017/9781009325844.
6. Jouzel, J., Delmotte, V.M., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*. 2007. Vol. 317 (5839), P.793-796. DOI:10.1126/science.1141038/
7. Kirsanov, A., Rozinkina, I., Rivin, G., Zakharchenko, D., Olchev, A. Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11(10), 1133. DOI: 10.3390/atmos11101133.
8. Lawrence, D., Coe, M., Walker, W., Verchot, L., Vandecar, K. The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate. *Front. For. Glob. Change* 2022. Vol. 5. 756115. DOI: 10.3389/ffgc.2022.756115
9. Papale, D. Ideas and perspectives: enhancing the impact of the FLUXNET network of eddy covariance sites, *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, P. 5587–5598, DOI:10.5194/bg-17-5587-2020.
10. Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., et al. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions*. Vol. 42. P. 153 - 168. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009



**Научный совет РАН по проблемам климата Земли
Отделение наук о Земле РАН
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН**

**Третья Всероссийская научная конференция
с международным участием
«Изменение климата: причины, риски, последствия,
проблемы адаптации и регулирования
(КЛИМАТ-2023)»**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 9 по 12 ноября 2023 г. в Российской академии наук (РАН) была проведена Третья Всероссийская научная конференция с международным участием «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования (КЛИМАТ-2023)», организованная Научным Советом РАН по проблемам климата Земли, Отделением наук о Земле РАН и Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Целью проведения конференции являлась организация площадки для представления и обсуждения новых актуальных результатов и проблем в области изменений климата, способствовать интеграции, в том числе междисциплинарной, ведущих научных коллективов, проводящих фундаментальные и прикладные исследования в области изменений климата, способствовать установлению контактов между различными научными коллективами, представителями государственного и коммерческого сектора.

Актуальность проведения конференции заключалась в существенности вызова, который ставит изменение климата перед человечеством в целом и Россией в частности. Рост глобальной приповерхностной температуры в последние десятилетия сопровождается быстрым таянием морских льдов, ледников суши и многолетнемерзлых грунтов, ростом уровня океана, изменением характера погодно-климатической изменчивости с увеличением интенсивности и повторе-

мости экстремальных явлений в атмосфере, гидросфере, криосфере, биосфере и литосфере. «Изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, которая выходит за рамки научной проблемы и представляет собой комплексную междисциплинарную проблему, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации» (Климатическая доктрина Российской Федерации). Происходящие изменения определяют необходимость учета изменения климата в качестве одного из ключевых долговременных факторов безопасности Российской Федерации, обуславливают необходимость заблаговременного формирования всеобъемлющего и взвешенного подхода к проблеме изменений климата и смежным вопросам с разносторонним анализом экологических, экономических и социальных проблем.

В рамках конференции в первый день работы было организовано пленарное заседание. С приветственным словом к участникам конференции обратились советник Президента Российской Федерации по вопросам климата Р.С.-Х. Эдельгериев и президент Российского гидрометеорологического общества А.И. Бедрицкий, выступили депутат Государственной Думы РФ Н.П. Николаев, вице-президенты РАН академики РАН С.М. Алдошин и С.Н. Калмыков. Были заслушаны 14 докладов от ведущих ученых России в области изменения климата, в том числе доклады сделали члены Совета РАН по проблемам климата Земли (со-председатель Совета академик РАН Мохов И.И., заместитель председателя Совета академик РАН Порфирьев Б.Н., академик РАН Мареев Е.А., академик РАН Клименко В.В., член-корр. РАН Семенов С.М., д.ф.-м.н. Катцов В.М., д.т.н. Вильфанд Р.М., д.э.н. Башмаков И.А., д.м.н. Ревич А.Б., д.х.н. Ишков А.Г. и другие).

В последующие дни работа конференции проходила по следующим направлениям (в рамках которых были представлены устные и стендовые доклады):

1. Климатические процессы и изменения: механизмы, предсказуемость, экстремальные режимы;
2. Моделирование Земной климатической системы и ее изменений в прошлом, настоящем и будущем;
3. Экологические и социально-экономические последствия климатических изменений, риски и возможности;
4. Проблемы адаптации к изменениям климата;
5. Проблемы регулирования и смягчения антропогенных воздействий на климат. Углеродная нейтральность;
6. Прикладные и технологические аспекты проблемы изменений климата.

Обсуждался широкий круг тем от региональных изменений климата и его влияния на различные составляющие окружающей среды (химический состав атмосферы, ледники и многолетнюю мерзлоту, атмосферную циркуляцию и т.д.) до моделирования климата, в том числе с применением нейронных сетей.

Ряд докладов был посвящен повышению предсказуемости климата, в том числе обсуждалось раннее предупреждение критических точек в климатиче-

Изменения климата:

причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

ской системе, предсказуемость режимов циркуляции в атмосфере средних широт. Значительное внимание в научных докладах было уделено вопросам оценки последствий климатических изменений и связанной с этим адаптации регионов России к изменяющемуся климату. В частности, были затронуты риски наводнений и засух, проблемы береговой эрозии в Российской Арктике, лесных пожаров, деградации почв.

Большое внимание уделялось экологическим и социально-экономическим последствиям, в том числе были представлены научные данные о реакции инвазивных видов на изменение климата, росте климатического ареала переносчиков некоторых опасных заболеваний (например, лихорадки Западного Нила), об избыточной смертности населения во время волн холода и волн жары, а также во время периодов аномального загрязнения воздуха.

В качестве мер адаптации обсуждался водно-зеленый каркас городов, сравнение мер по озеленению городов и побелке крыш. Во время одного из докладов был представлен план адаптации города Москвы. Рассматривались наиболее вероятные сценарии прихода России к углеродной нейтральности. В частности, было отмечено, что скорость снижения выбросов парниковых газов на душу населения должна составлять 0.5 % в год за счёт умеренного возрастания поглощающей способности лесов главным образом благодаря реализации лесоклиматических проектов и снижению пожарной эмиссии. Были представлены результаты оценки изменений потенциала ветровой энергетики в Арктике. Была подчеркнута важность учёта климатической науки в принятии государственно важных решений.

В мероприятиях Конференции приняли участие более 400 ведущих климатологов страны из более 100 организаций, было представлено 220 докладов (пленарных, устных и стендовых) Участники представляли научно-исследовательские институты РАН, высшие учебные заведения, Институты Росгидромета. В мероприятиях Конференции приняли участие также представители федеральных и региональных органов власти, институтов развития, коммерческих компаний, средств массовой информации. Конференция и представленные на ней результаты получили широкое освещение в средствах массовой информации.

Во время проведения конференции был проведен конкурс на лучшие доклады молодых ученых, по итогам конференции награду получили 6 молодых ученых из различных Институты РАН и ВУЗов.

Участники Конференции ОТМЕЧАЮТ:

Проведение Конференции способствовало:

- развитию новых направлений фундаментальных и прикладных исследований в области климата;
- информационному и научному обеспечению адаптации к изменениям климата в отраслях и регионах в рамках Национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата до 2025 года;

- учету факторов изменения климата при разработке планов устойчивого развития Российской Федерации, в том числе, в рамках Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года;
- реализации Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы;
- принятию и обеспечению решений в рамках международных климатических соглашений и при реализации Климатической доктрины Российской Федерации.

Участники Конференции РЕКОМЕНДУЮТ:

учитывая высокую актуальность научных направлений, новизну и значимость доложенных результатов, Научному совету РАН по проблемам климата Земли подготовить предложения по актуализации федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы, сформировав важнейшие инновационные проекты государственного значения:

- «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования и реализации»;
- «Мониторинг аномальных процессов и явлений в различных средах, связанных с климатическими изменениями на территории Российской Федерации, ее отдельных регионов и в прилегающих акваториях с использованием данных дистанционного зондирования, наземных данных и результатов моделирования».

Сопредседатель
Научного Совета РАН
по проблемам климата Земли
академик РАН В.Г. Бондур

Сопредседатель
Научного Совета РАН
по проблемам климата Земли
академик РАН И.И. Мохов

Под редакцией
академика РАН И.И. Мохова,
члена-корреспондента РАН А.А. Макоско,
к.ф.-м.н. А.В. Чернокульского

**ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
ПРИЧИНЫ, РИСКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ,
ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ
И РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Формат 70x100 1/16
Гарнитура Times
Усл.-п. л. 29,25. Уч.-изд. л. 23,06
Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции