

ISSN 0130-2906

По каталогу Роспечати “Газеты. Журналы”

Индекс 70536  
для индивидуальных  
подписчиков

Индекс 70525  
для предприятий  
и организаций

Индекс 71683  
(годовая подписка)

По объединенному каталогу “Пресса России”

Индекс 87789  
для индивидуальных  
подписчиков

Индекс 87788  
для предприятий  
и организаций

# МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ

2020 № 5

Изменение климата, последствия  
и ответная стратегия

ISSN 0130-2906 “Метеорология и гидрология”, 2020, № 5, 1–144

МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ 2020 № 5



ФГБУ “Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии “Планета”

2020

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР** АСМУС ВАСИЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,  
д-р физ.-мат. наук, профессор

**РЕДКОЛЛЕГИЯ:** РЕСНЯНСКИЙ ЮРИЙ ДМИТРИЕВИЧ  
(зам. главного редактора), д-р физ.-мат. наук

ИВАНОВА АННА РУДОЛЬФОВНА (ответственный секретарь), д-р физ.-мат. наук  
БОЛГОВ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ, д-р техн. наук, профессор  
ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, д-р геогр. наук, профессор  
ДОБРОЛЮБОВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, д-р геогр. наук, профессор, член-корр. РАН  
КЛЕЩЕНКО АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ, д-р геогр. наук, профессор  
КРЫЖОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, д-р геогр. наук  
МЕЛЕШКО ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ, д-р физ.-мат. наук  
СЕМЕНОВ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, д-р физ.-мат. наук, профессор  
ТОЛСТЫХ МИХАИЛ АНДРЕЕВИЧ, д-р физ.-мат. наук  
ХРИСТОФОРОВ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, д-р геогр. наук, профессор  
ЧЕРНОГАЕВА ГАЛИНА МИХАЙЛОВНА, д-р геогр. наук, профессор  
ЦАТУРОВ ЮРИЙ САРКИСОВИЧ, канд. техн. наук

**ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ** БОРИСОВА ВЕРА ВАСИЛЬЕВНА

Ежемесячный научно-технический журнал “Метеорология и гидрология” является рецензируемым изданием и входит в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в международные реферативные базы данных или системы цитирования Web of Science, Scopus и Springer.

Электронные версии журнала на русском языке доступны на сайте Научной электронной библиотеки <http://www.elibrary.ru>.

Журнал издается на английском языке с 1976 г. под названием “Russian Meteorology and Hydrology”. Электронные версии статей на английском языке доступны на сайтах <http://pleiades.online>, <http://link.springer.com>.

Плата за публикацию статей не взимается.

**Учредитель журнала — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды**

Зам. зав. редакцией О. Ф. Осетрова  
Редакторы Е. Е. Смирнова, Т. И. Крюк  
Корректор Г. С. Литовченко  
Верстка О. В. Нестеровой  
Рисунки А. И. Гавриченко, Е. В. Дерюгиной  
Подписано к печати 24.04.2020. Формат 70x108 1/16  
Усл.печ.л. 11,2. Усл.кр.-отт. 8,55.  
Уч.-изд.л. 12,26. Тираж 300.  
Индекс ММ-4.

Набрано в ФГБУ “НИЦ “Планета”  
123376 Москва, Б. Предтеченский пер., 7  
Отпечатано ООО “АС-Медиа”, 125252 Москва, ул. Зорге, д. 15

|   |     |
|---|-----|
| К 90-летию со дня рождения Юрия Антониевича Израэля (1930—2014 гг.)   | 5   |
| Р. С. Х. Эдельгериев, А. А. Романовская<br>Новые подходы к адаптации к изменению климата на примере Арктической зоны Российской Федерации   | 12  |
| М. Ю. Бардин, Э. Я. Ранькова, Т. В. Платова, О. Ф. Самохина, И. А. Корнева<br>Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга   | 29  |
| В. М. Катцов, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник, Ю. Л. Рудакова<br>Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации   | 46  |
| С. М. Семенов, И. О. Попов, В. В. Ясюкевич<br>Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата   | 59  |
| В. А. Гинзбург, С. В. Кострыкин, А. Г. Рябошапка, А. П. Ревокатова, И. О. Бушмелев<br>Условия стабилизации средней глобальной приповерхностной температуры на уровнях +2 и +1,5°C при использовании геоинженерного метода на основе стратосферных аэрозолей | 66  |
| А. Н. Гельфан, А. С. Калугин, И. Н. Крыленко, О. Н. Насонова, Е. М. Гусев, Е. Э. Ковалев<br>О проблеме тестирования гидрологической модели для оценки влияния изменений климата на речной сток  | 77  |
| А. Б. Полонский, А. Н. Серебренников<br>Интенсификация восточных пограничных апвеллинговых систем в Атлантическом и Тихом океанах   | 86  |
| И. В. Серых, А. Г. Костяной<br>О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря   | 96  |
| В. П. Горбатенко, И. В. Кузевская, К. Н. Пустовалов, В. В. Чурсин, Д. А. Константинова<br>Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири   | 108 |
| П. А. Торопов, М. А. Алешина, Г. А. Носенко, Т. Е. Хромова, С. А. Никитин<br>Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины  | 118 |
| О. А. Анисимов, С. А. Зимов, Е. М. Володин, С. А. Лавров<br>Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат   | 131 |
| Всероссийская научная конференция с международным участием “Экология и климат”  | 144 |
| <b>ДИСКУССИОННЫЕ ВОПРОСЫ</b>  |     |
| <b>ХРОНИКА</b>  |     |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
|            | To the 90th Anniversary<br>of the Birth of Y. A. Israel (1930—2014)<br><i>R. S. Kh. Edel'geriev and A. A. Romanovskaya</i>  | 5   |
|            | New Approaches to the Adaptation to Climate Change:<br>The Case of the Arctic Zone of Russia<br><i>M. Yu. Bardin, E. Ya. Ran'kova,<br/>T. V. Platova, O. F. Samokhina,<br/>and I. A. Korneva</i>  | 12  |
|            | Modern Surface Climate Change as Inferred<br>from Routine Climate Monitoring Data<br><i>V. M. Kattsov, E. I. Khlebnikova,<br/>I. M. Shkol'nik, and Yu. L. Rudakova</i>  | 29  |
|            | Probabilistic Regional Climate Projecting<br>as a Basis for Development of Adaptation<br>Programs in the Economy of the Russian Federation<br><i>S. M. Semenov, I. O. Popov,<br/>and V. V. Yasyukevich</i>  | 46  |
|            | Statistical Model for Assessing the Formation<br>of Climate-related Hazards Based on Climate<br>Monitoring Data<br><i>V. A. Ginzburg, S. V. Kostrykin,<br/>A. G. Ryaboshapko, A. P. Revokatova,<br/>and I. O. Bushmelev</i>   | 59  |
|            | Conditions for Stabilization of Average Global Surface<br>Temperature at the Levels of +2°C and +1.5°C by the<br>Geoengineering Method Based on Stratospheric Aerosols<br><i>A. N. Gel'fan, A. S. Kalugin, I. N. Krylenko,<br/>O. N. Nasonova, E. M. Gusev, and E. E. Kovalev</i> | 66  |
|            | Testing a Hydrological Model to Evaluate Climate<br>Change Impact on River Runoff<br><i>A. B. Polonskii and A. N. Serebrennikov</i>   | 77  |
|            | Intensification of the Eastern Boundary Upwelling<br>Systems in the Atlantic and Pacific Oceans<br><i>I. V. Serykh and A. G. Kostyanoi</i>  | 86  |
|            | The Links of Climate Change in the Caspian<br>Sea to the Atlantic and Pacific Oceans<br><i>V. P. Gorbatenko, I. V. Kuzhevskaya,<br/>K. N. Pustovalov, V. V. Chursin,<br/>and D. A. Konstantinova</i>  | 96  |
|            | Assessment of Atmospheric Convective Potential<br>Variability in Western Siberia in a Changing Climate<br><i>P. A. Toropov, M. A. Aleshina,<br/>G. A. Nosenko, T. E. Khromova,<br/>and S. A. Nikitin</i>  | 108 |
|            | The Altai Glacier Degradation: Effects<br>and Possible Reasons<br><i>O. A. Anisimov, S. A. Zimov,<br/>E. M. Volodin, and S. A. Lavrov</i>   | 118 |
| DISCUSSION | Methane Emission in the Russian Permafrost Zone<br>and Assessment of Its Impact on Global Climate   | 131 |
| CHRONICLE  | All-Russian Scientific Conference with International<br>Participation "Ecology and Climate"   | 144 |

## Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации

В. М. Катцов\*, Е. И. Хлебникова\*,  
И. М. Школьник\*, Ю. Л. Рудакова\*

*Рассматриваются возможности вероятностного сценарного прогнозирования регионального климата, ориентированного на проведение массовых ансамблевых расчетов и обеспечивающего горизонтальное разрешение 25 км по всей территории России. Основное внимание уделяется анализу будущих изменений климатических показателей термического режима и режима увлажнения, существенно влияющих на надежность функционирования сооружений и технических систем, включая объекты транспортной и энергетической инфраструктуры. Наряду с оценкой средних изменений, для количественного описания ожидаемых изменений используются частотные критерии, дающие представление о возможной повторяемости экстремальных событий различной интенсивности в середине и конце XXI в. Полученные результаты могут рассматриваться как информационная основа для разработки адаптационных программ в экономике России.*

**Ключевые слова:** изменения климата, региональные модели, экстремумы, риски, адаптация.

### 1. Введение

Несмотря на то что Климатическая доктрина Российской Федерации определила роль адаптации в национальной климатической политике по меньшей мере как равнозначную сокращению антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу, до недавнего времени адаптация к изменениям климата не входила в число текущих национальных приоритетов развития, в том числе развития бизнеса. Принятые кратко- и среднесрочные программы развития экономики и регионов Российской Федерации, как правило, не содержат мер адаптации к ожидаемым изменениям климата. Ситуация стала меняться в связи с подписанием Российской Федерацией Парижского соглашения 2015 г., достигнутого на 21-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата, и разработкой Национального плана адаптации к изменениям климата.

В соответствии с концепцией этого плана [3], одним из основных принципов планирования адаптации является “надлежащее научное обеспече-

---

\* Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова; e-mail: khlebnikova\_e@mail.ru (Хлебникова Елена Ивановна).

ние прогнозирования климата и климатического обслуживания”. При разработке стратегий адаптации к изменениям климата важно опираться на развитую базу знаний и базы данных, пополняемые и обогащаемые благодаря функционированию национальных научных центров, систем погодно-климатического мониторинга и прогноза, которые интегрируются в Глобальную рамочную основу климатического обслуживания (ГРОКО). Последняя активно развивается в системе ООН при лидирующей роли Всемирной метеорологической организации (ВМО).

В работе над адаптационными программами необходимо учитывать не только наблюдаемые изменения, но и сценарные прогнозы изменения климата, полученные с помощью климатических моделей. Если в конце XX в. — начале XXI в. в качестве основного инструмента получения научно обоснованной информации о будущем климате в тех или иных регионах рассматривались глобальные климатические модели, то в последние годы для построения сценарных прогнозов изменения климата и анализа соответствующих климатических воздействий все чаще привлекаются ансамблевые расчеты с использованием региональных моделей [20]. Такая тенденция связана с их относительно высоким пространственным разрешением и лучшим (по сравнению с глобальными моделями) воспроизведением экстремальных событий в сочетании с количественным описанием неопределенностей оценок, обусловленных влиянием собственной изменчивости климатической системы в мезомасштабном диапазоне.

В последние годы в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) интенсивно используется технология вероятностного климатического прогнозирования на основе массовых ансамблевых расчетов с высокоразрешающей системой моделей [4]. Центральным компонентом этой системы является региональная климатическая модель [21], обеспечивающая горизонтальное разрешение 25 км по всей территории России.

В рамках данной работы рассматриваются некоторые возможности применения указанной технологии для обоснования адаптационных программ и планов действий в отраслях экономики России. Основное внимание уделяется изменениям климатических показателей термического режима и режима увлажнения, существенно влияющим на надежность функционирования сооружений и технических систем, включая объекты транспортной и энергетической инфраструктуры. Наряду с оценкой средних изменений, для количественного описания ожидаемых изменений используются частотные критерии, дающие представление о возможной повторяемости экстремальных событий различной интенсивности в середине и конце XXI в.

## 2. Методы анализа и данные

При анализе изменения климатических воздействий на экономику используется, как правило, так называемый индикаторный подход [19, 24], предполагающий привлечение специальных климатических индексов, изменение которых отражает то или иное влияние на рассматриваемые объекты. Для некоторых видов воздействий возможно применение интегрированного подхода [25], в рамках которого модели воздействия (физические, экономические) непосредственно связываются с моделями изменения климата. Однако такой подход обычно реализуется на основе упрощенных

климатических моделей. Прямое использование выходной продукции сложных климатических моделей является довольно редким (см., например, [31]). Даже при наличии развитых физических моделей отклика (например, “климат — почва — урожай”) их применению предшествует, как правило, оценка изменений специализированных климатических показателей (например, агроклиматических индексов [29]).

При получении перспективных оценок изменения климата, которые широко применяются в импактных исследованиях [26, 30], первоочередное внимание обычно уделяется оценкам индексов, рекомендованных экспертами ВМО для анализа изменений климата и в особенности его экстремальности по данным о температуре воздуха и количестве осадков суточного разрешения. Наибольшее распространение имеет набор ключевых индексов, предложенных группой экспертов по обнаружению изменений климата и индексам (ETCCDI). Эти показатели, а также расширенный набор индексов (ET-SCI) ориентированы в основном на диагностические исследования в разных регионах земного шара, обеспечивающие возможность анализа современных и будущих изменений рассматриваемых климатических показателей в глобальном масштабе [23, 32]. Однако при разработке адаптационных программ на национальном уровне необходимо дополнительно учитывать региональные климатические особенности, а также практику использования климатической информации для прикладных целей.

В данной работе при изучении будущих изменений термического режима рассматривался ряд показателей, имеющих универсальное назначение, в частности годовые и сезонные экстремумы температуры воздуха заданного периода осреднения (1, 5, 10, 30 сут), которые определялись по данным о суточной минимальной, суточной максимальной и средней суточной температуре воздуха, а также характеристики внутригодовых периодов с температурой воздуха выше или ниже пороговых значений. В качестве пороговых значений выбирались уровни, критически важные для обеспечения потребностей строительства, наземного транспорта, энергетики (0, 8, 18 С). Рассчитывались характеристики отопительного периода (т. е. периода между датами устойчивого перехода через уровень 8 С осенью и весной [13]), а также аналогичные показатели, связанные с устойчивым переходом температуры воздуха через 0 С. Для анализа изменения энергопотребления в теплый сезон использовался индекс, известный как “дефицит холода” [13], который входит в перечень ET-SCI (CDDcold) и рассчитывается как годовая сумма превышений средней суточной температуры воздуха уровня 18 С. Для холодного сезона оценивался “дефицит тепла”, известный в России как “градусо-сутки отопительного периода”. Этот показатель аналогичен индексу HDDheat, входящему в перечень ET-SCI, который рассчитывается как сумма абсолютных отклонений средней суточной температуры воздуха от базового уровня 18 С за выбранный календарный период (год, месяц). В отличие от зарубежной практики, в России дефицит тепла определяется для отопительного периода и широко используется при строительном проектировании. Особое внимание уделялось оценке такого показателя, как число дней с переходом температуры возду-

ха через  $0\text{ C}$ , изменение которого существенно влияет на долговечность зданий и сооружений. Кроме того, рассматривались показатели режима атмосферных осадков — сезонные максимумы суточных сумм осадков и длительность сухих и влажных периодов.

Анализ изменения выбранных климатических показателей в XXI в. основан на результатах массовых ансамблевых расчетов, которые были проведены для территории России с помощью региональной климатической модели ГГО, встроенной в глобальную модель общей циркуляции атмосферы ГГО. Описание данной технологии климатического прогнозирования и некоторые результаты ее применения нашли отражение в работах [4—6, 12, 22, 29, 31].

Численные эксперименты проводились от разных (случайных) начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для базового десятилетнего периода конца XX в. (1990—1999 гг.) и периодов 2050—2059 и 2090—2099 гг. с применением сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5 [33]. Задание граничных условий на поверхности океана осуществлялось на основе расчетов температуры поверхности океана и сплоченности морского льда для рассматриваемых 10-летних интервалов по пяти глобальным моделям CMIP5 (о перечне моделей и подходе к их отбору — см. работу [6]). Для всех пяти вариантов изменения граничных условий было проведено по 10 экспериментов от разных (случайных) начальных условий — т. е. всего по 500 лет модельного времени для каждого из рассматриваемых десятилетних периодов.

Проведению расчетов специализированных показателей предшествовал анализ качества воспроизведения региональной климатической моделью базовых параметров временных метеорологических рядов суточной дискретности. Следует отметить, что проверка согласия эмпирических и модельных данных — в случае, когда рассматриваются оценки по ансамблю начальных и граничных условий, — вообще говоря, сопряжена с разработкой специальных вероятностных подходов и заслуживает дополнительного углубленного анализа [11]. В настоящей работе основное внимание уделялось воспроизведению годового хода статистических характеристик температуры воздуха суточного разрешения, важному с точки зрения оценки продолжительности периодов выше или ниже критических значений. Сравнение модельных и эмпирических данных для контрольного периода (1990—1999 гг.) осуществлялось с использованием информации о температуре воздуха суточного разрешения из архива ВНИИГМИ-МЦД (более 500 метеорологических станций на территории России). Были выявлены различия, имеющие региональные особенности, в частности занижение летних максимумов температуры воздуха в европейской части России (ЕЧР) и преобладание завышенных максимумов в азиатской части России (АЧР). Последующее согласование модельных и эмпирических данных выполнялось с применением вероятностного подхода [28], являющегося модификацией метода квантильного согласования [27]. Этот подход использовался ранее для территории России при анализе ожидаемых климатических изменений по ансамблю глобальных моделей [18].

### 3. Ансамблевые оценки изменений специализированных индикаторов температуры воздуха и количества осадков

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

Сокращение продолжительности отопительного периода (рис. 1а), а также связанное с этим уменьшение градусо-суток отопительного периода [6] является одним из позитивных проявлений изменения климата на территории России. Наибольшее сокращение продолжительности отопительного периода ожидается на северо-востоке ЕЧР, а также на Чукотке и Камчатке (примерно на 50 дней к середине XXI в.). Потенциально это может способствовать уменьшению уровня потребления энергии в холодный период года. Однако для извлечения реальной выгоды необходимо внедрение современных технологий производства энергии и теплоснабжения [8, 13]. Как показывают модельные оценки, при отсутствии модернизации на значительной территории России сокращение продолжительности отопительного периода будет сопровождаться усилением негативных тенденций, снижающих эффективность и качество теплоснабжения городов. При сохранении действующих технологий централизованного теплоснабжения к середине XXI в. доля среднего числа дней с избыточным потреблением тепла в европейской части России может превысить 30—40% от общей продолжительности отопительного периода (рис. 1б). При этом, как показано в работе [6], в 5—7 раз увеличится частота зим с большой долей числа дней с “перетопом”, вероятность которых в конце XX в. составляла лишь 5%. Одновременно увеличится и число дней с “недотопом”.

Продолжительность периода с отрицательной температурой воздуха и соответствующее число градусо-дней [14] являются важными характеристиками холодного климата, свидетельствующими о степени его суровости. Уменьшение периода с температурой воздуха менее 0 °C к середине XXI в. (рис. 1в) составит более 20 дней на большей части территории России и благотворно повлияет на добычу первичных энергоресурсов, функционирование наземного транспорта, а также проведение строительных работ.

Анализ будущих изменений пороговых характеристик суточных минимумов температуры воздуха, выполненный на основе экспериментов, выявил [6] значительное сокращение числа дней с низкой температурой (ниже –30 °C) в азиатской части Арктической зоны РФ, которое уменьшит негативное температурное воздействие на характеристики материалов различных конструкций. В то же время практически на всей территории ЕЧР возрастет число дней с переходом температуры воздуха через 0 °C (т. е. дней с разными знаками суточного минимума и суточного максимума температуры) в период с ноября по март, который рассматривается в строительной климатологии как холодный сезон (рис. 1г). Наибольшее увеличение — в южных районах ЕЧР, Средней Сибири, Прибайкалья и Забайкалья, на прибрежных территориях Дальнего Востока — к середине XXI в. превысит 10 случаев за сезон. Изменение этого климатического показате-

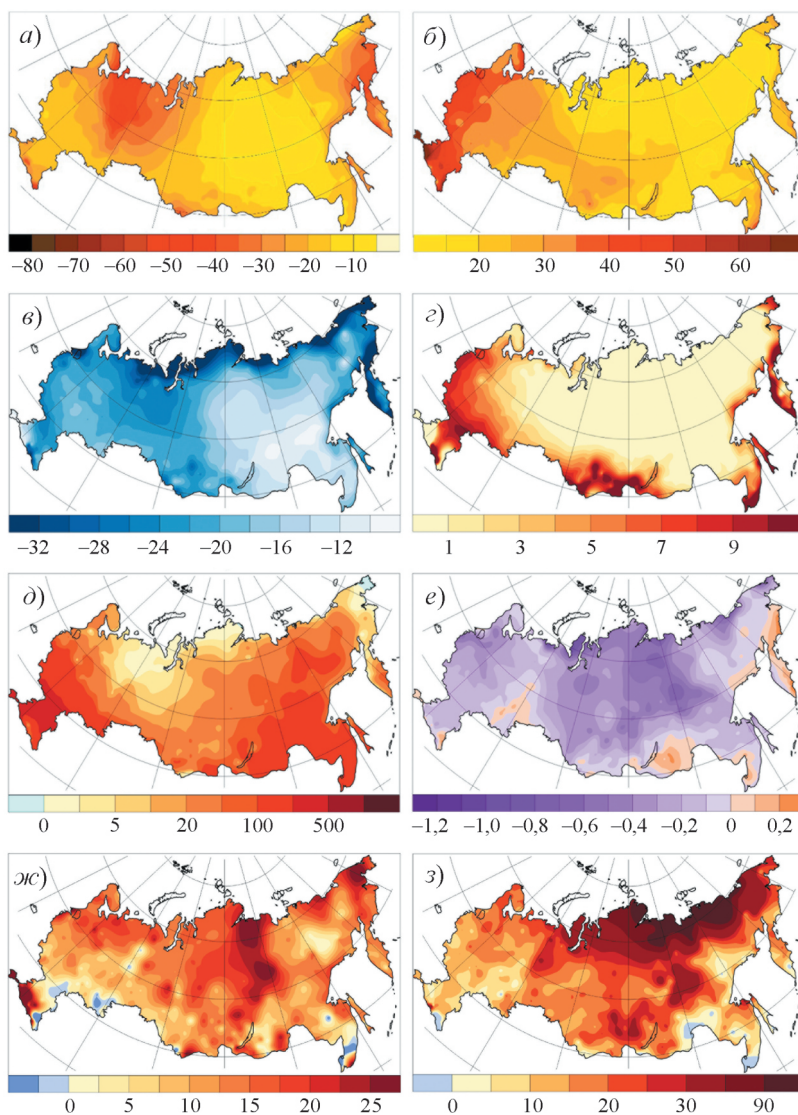


Рис. 1. Медианные ансамблевые оценки изменения показателей термического режима и режима увлажнения в 2050—2059 гг. по отношению к 1990—1999 гг.

*a)* продолжительность (дни) отопительного периода; *б)* доля (%) числа дней с избыточным теплотреблением от общей продолжительности отопительного периода; *в)* число дней с отрицательной температурой воздуха; *г)* число внутрисуточных переходов температуры воздуха через 0 °C (ноябрь — март); *д)* дефицит холода (°C); *е)* средняя суточная амплитуда температуры воздуха летнего сезона (°C); *ж)* максимум суточных сумм осадков теплого сезона (%); *з)* максимум суточных сумм осадков холодного сезона (%).

ля будет способствовать усилению температурно-влажностных деформаций, оказывающих разрушающее воздействие на здания и сооружения, включая автомобильные дороги.

Изменения климата существенно повлияют на эффективность, надежность и безопасность объектов энергетической инфраструктуры. Повышение температуры воздуха в летнее время уменьшит эффективность про-

цессов генерации и передачи электроэнергии. В то же время ожидается весьма заметный рост на большей части территории России такого показателя, как дефицит холода (рис. 1д).

Интересные особенности обнаруживаются в изменении суточной амплитуды температуры воздуха, которая используется в строительной климатологии при определении нормативных параметров температурных воздействий, являющихся одним из видов атмосферных нагрузок. Средние значения этой величины для теплого сезона (рис. 1е) уменьшаются на большей части территории России. Однако на юго-востоке ЕЧР и в прилегающих районах Западной Сибири, в Забайкалье и южных районах Дальнего Востока, на Чукотке и Камчатке к середине XXI в. ожидается тенденция увеличения суточной амплитуды. Эта тенденция, усиливающаяся к концу века, хорошо проявляется в областях роста максимальной непрерывной продолжительности сухих периодов, отмечаемого как по модельным данным, так и по данным наблюдений [16], и может быть связана с влиянием изменения влажности почвы.

Существенные изменения, сопряженные с высокими рисками, ожидаются в режиме атмосферных осадков на территории России. Эти изменения проявляются уже к середине XXI в. и в определенной степени согласуются с наблюдаемыми тенденциями [16]. Рост сезонных максимумов в теплый сезон (рис. 1ж) отмечается практически на всей территории, за исключением небольшой области, прилегающей к Каспийскому морю. Наибольшее относительное увеличение (около 30%) ожидается на территории Сибирского федерального округа, а также — еще более значительное — в горных районах Кавказа. В холодный сезон относительное увеличение максимумов суточных сумм отмечается практически повсеместно (рис. 1з). На севере ЕЧР относительное увеличение составит около 20%, а в азиатской части Арктической зоны РФ сезонные максимумы предположительно вырастут на 100% и более.

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

#### **4. Вероятностные характеристики изменения специализированных климатических показателей**

В контексте адаптации к изменениям климата для оценки рисков и оптимизации принимаемых решений на региональном уровне важно представлять, с какой вероятностью на выбранном временном интервале рассматриваемый индикатор может принимать то или иное значение. Массо-

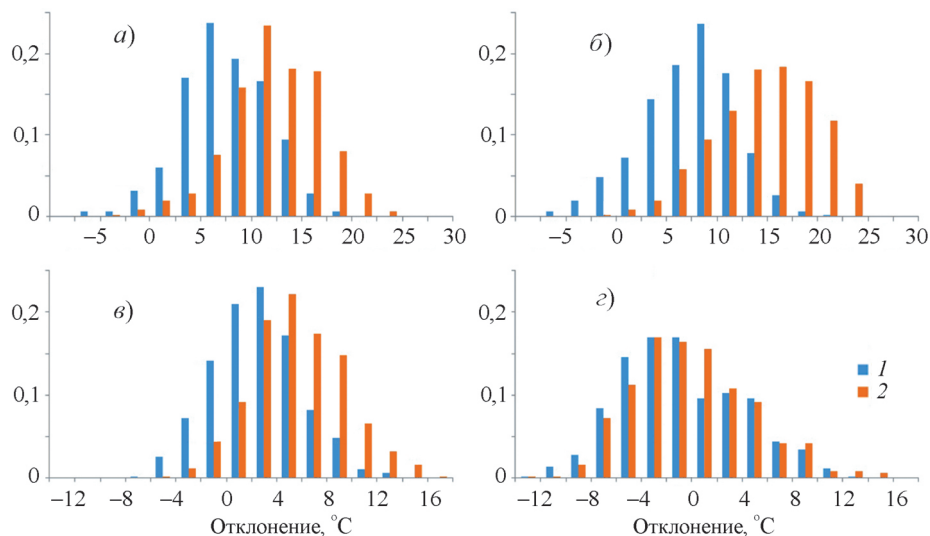


Рис. 2. Вероятностные распределения отклонений годовых минимумов (*а, б*) и максимумов (*в, з*) температуры воздуха в 2050—2059 (*1*) и в 2090—2099 гг. (*2*) от их средних значений в 1990—1999 гг. в различных регионах Арктической зоны РФ (*а, в* — Нарьян-Мар; *б, з* — Хатанга).

вые ансамблевые расчеты (500 годовых реализаций) дают возможность оценить будущие изменения рассматриваемых показателей в вероятностном аспекте.

На рис. 2 демонстрируются вероятностные распределения ожидаемых изменений для годового минимума и годового максимума температуры воздуха в различных регионах Арктической зоны РФ. Годовые минимумы уже к середине XXI в. и в Нарьян-Маре, и в Хатанге с вероятностью более 95% превысят их среднее значение для конца XX в. В то же время особенности изменения годовых максимумов в Ненецком автономном округе и в Таймырском муниципальном районе существенно различаются. Если в Нарьян-Маре к середине XXI в. максимумы могут быть меньше современной нормы с вероятностью менее 10%, то в Хатанге эта вероятность превышает 40%. Сравнение распределений изменения годовых максимумов для середины и конца XXI в. показывает, что близость наиболее вероятных значений не означает тождественности распределений в целом. По мере усиления антропогенного воздействия происходит трансформация распределений, особенно заметная на их концах.

Наиболее важно учитывать изменение формы распределения характеристик режима увлажнения, и применительно к экстремально высоким значениям сумм осадков этот вопрос заслуживает специального обсуждения. Для адаптации и эффективного функционирования генерирующих объектов в энергетике важной также является детализация представлений о будущих изменениях показателей, связанных с периодами дефицита осадков в теплый сезон. Согласно модельным оценкам, полученным с помощью рассматриваемой технологии [16], к середине XXI в. ожидается увеличение средних значений максимальной непрерывной продолжительности сухих периодов в центральных и южных районах ЕЧР и прилегаю-

щих районах Западной Сибири, а также в Приамурье, Приморье и на Камчатке. Как показывают современные расчеты, в дальнейшем, к концу века, частота продолжительных сухих периодов, вероятность которых в конце XX в. составляла 10%, увеличится в критических областях в 2 раза и более (рис. 3). На юго-востоке ЕЧР, в частности в Волгоградской области, будут отмечаться экстремально продолжительные сухие периоды, превышающие современные средние значения более чем на 1 месяц [6].

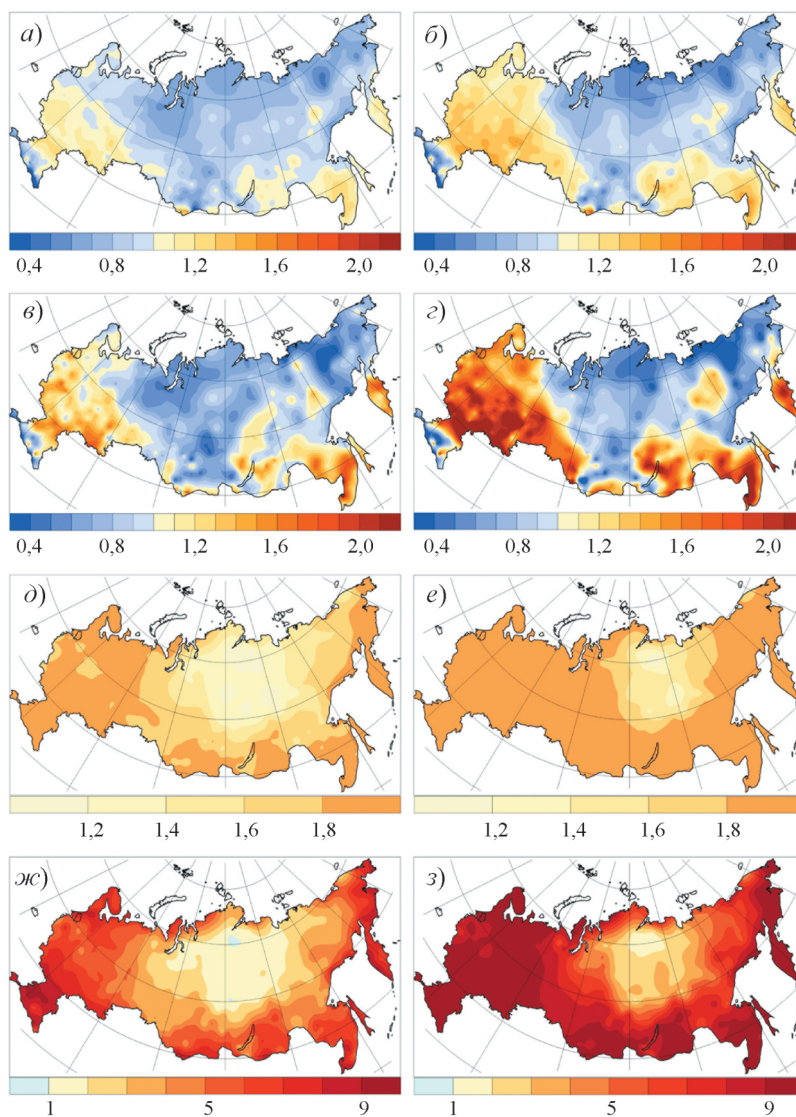


Рис. 3. Изменение частоты превышения различных уровней для максимальной продолжительности сухого периода теплого сезона (а—с) и температуры наиболее жаркой 30-дневки (д—з) в 2050—2059 гг. (а, в, д, ж) и в 2090—2099 гг. (б, г, е, з) по отношению к 1990—1999 гг.: относительное изменение доли лет со значениями, превышающими 50-й (а, б, д, е) и 90-й (в, г, ж, з) процентиль базового периода.

Под сухим периодом понимается период с суточными суммами осадков  $P < 1$  мм.

Для обеспечения достаточного уровня надежности существующих и проектируемых объектов (зданий, сооружений, автомобильных и железных дорог и пр.) необходим своевременный анализ будущих изменений в режиме экстремально высоких значений температуры, а также корректная оценка сохраняющихся рисков, связанных с экстремально низкими значениями температуры. В работах [15, 17] детально рассматривается вопрос о современных и будущих изменениях характеристик редких экстремумов на территории России по отношению к средней суточной температуре воздуха. Статистическая интерпретация результатов моделирования с привлечением теоретических методов анализа экстремумов [15] дала возможность получить оценки изменения квантилей редкой повторяемости для сезонных температурных экстремумов в XXI в. Вместе с тем для умеренных экстремумов различных показателей, соответствующих периодам повторяемости 10 лет и менее, изменение частоты их повторения может быть оценено на основе анализа имеющихся результатов массовых ансамблевых расчетов.

К числу наиболее важных индикаторов экстремальности теплого сезона относится температура наиболее жаркого периода заданной продолжительности (1 сутки, 5 суток, 1 декада, 1 месяц). Система таких индикаторов характеризует возможную интенсивность температурных воздействий разной длительности. Вероятностный анализ ансамблевых расчетов для температуры наиболее жаркого месяца (рис. 3) показывает, что согласно сценарию RCP8.5 к середине XXI в. в ЕЧР значения этой величины, превышающие 50-й перцентиль конца XX в., будут наблюдаться практически ежегодно (увеличение частоты данного уровня близко к 2). При этом в южных районах ЕЧР ежегодные значения температуры наиболее жаркого месяца превысят 90-й перцентиль конца XX в., а на остальной территории частота превышения этого уровня увеличится примерно в 5 раз, т. е. соответствующие значения будут наблюдаться в среднем через год.

Азиатская часть России отличается высокой степенью неоднородности территории по отношению к скорости потепления в летний сезон (рис. 3). В южных районах Сибири, в Приморье, а также на прибрежных территориях дальневосточных морей ожидаются изменения, близкие к тем, которые характерны для ЕЧР. В то же время в АЧР остается значительная территория, где не предвидится существенного увеличения летних экстремумов даже к концу XXI в.

Вероятностные характеристики изменения летних температурных экстремумов наглядно демонстрируют основные особенности процесса антропогенного потепления в разных регионах России в ближайшие десятилетия с учетом вклада внутренней климатической изменчивости. Существенные различия в характере потепления между ЕЧР и АЧР, которые обнаруживаются в современных условиях по данным наблюдений (в особенности при рассмотрении пространственно-осредненных оценок [1]), являются закономерными и подтверждают обоснованность сценарных прогнозов регионального климата.

## 5. Заключение

Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата дало возможность получить количественные оценки будущих изменений

для широкого круга климатических показателей термического режима и режима увлажнения на территории России в XXI в., которые могут рассматриваться как информационная основа для разработки адаптационных программ в экономике России.

Кроме известных индексов экстремальности термического режима и режима увлажнения, имеющих универсальное назначение, проанализировано изменение специализированных показателей, влияющих на надежность сооружений и технических систем, включая объекты транспортной и энергетической инфраструктуры. Формирование большого ансамбля расчетов способствовало повышению достоверности полученных оценок и позволило уверенно диагностировать изменения различных показателей, характеризующихся высоким уровнем естественной изменчивости (в первую очередь показателей экстремальности осадков).

Наряду с получением медианных ансамблевых оценок изменения средних значений выполнен анализ будущих изменений рассматриваемых показателей в вероятностном аспекте. На примере важных характеристик экстремальности термического режима и режима увлажнения теплого сезона (температуры наиболее жаркой 30-дневки и максимальной продолжительности сухого периода) продемонстрированы основные региональные особенности процесса антропогенного потепления в ближайшие десятилетия с учетом вклада внутренней климатической изменчивости. Выявлены существенные различия в характере антропогенного потепления между европейской частью и отдельными регионами азиатской части России, которые хорошо согласуются с современными данными наблюдений.

Необходимо подчеркнуть, что форма представления результатов оценки изменений имеет значение в контексте установления взаимодействия между климатологами и лицами, принимающими решения. Можно ожидать, что результаты, представленные в виде частоты повторения тех или иных экстремальных событий (в отличие от оценок изменения средних значений при определенном уровне значимости), будут способствовать лучшему взаимопониманию с бизнес-сообществом, влияющим на выбор стратегии адаптации в экономике России.

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

Существует целый ряд научных проблем использования модельных данных в исследованиях климатических воздействий, требующих решения. Особого внимания заслуживают вопросы, связанные с подходами к формированию модельных ансамблей и суперансамблей (включая оптимальность размера ансамбля и проблемы дискриминации моделей в мультимодельных ансамблях [7]); с соотношением “добавленного качества” и “добавленных неопределенностей” при использовании различных инстру-

ментов и технологий пространственной детализации результатов моделирования климатической системы; с разной степенью доверия к оценкам будущих изменений различных климатических характеристик, а также специальные вопросы статистической интерпретации модельных климатических данных для прикладных целей [2].

В связи с этим использованная в настоящей работе технология вероятностного сценарного прогнозирования подлежит развитию, а полученные в результате ее применения количественные оценки изменений климата и соответствующие неопределенности — дальнейшему уточнению, в том числе за счет использования иных подходов к формированию ансамблей сценарных прогнозов.

Авторы выражают глубокую признательность руководству и сотрудникам Главного вычислительного центра Росгидромета за помощь в проведении ряда численных экспериментов в рамках настоящего исследования на суперкомпьютере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00063).

## Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. — М., Росгидромет, 2019, 68 с.
2. Катцов В. М. Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра. /В сб.: Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. — СПб, Д Арт, 2015, с. 66—80.
3. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана. — Труды ГГО, 2017, вып. 586, с. 7—20.
4. Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В. Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах. — Метеорология и гидрология, 2017, № 7, с. 68—80.
5. 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 ГГО, 2016, вып. 583, с. 7—29.
6. 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 ГГО, 2019, вып. 593, с. 6—52.
7. Павлова Т. В., Катцов В. М., Мелешко В. П. и др. Новое поколение климатических моделей. /В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, с. 286—320.
8. Приоритеты устойчивого развития Москвы: энергоэффективность, снижение уязвимости, климатическая адаптация. /Е. Г. Гашо, М. В. Степанова (ред.). Материалы научно-практической конференции “Экология Московского региона — 2017”. — М., 2017, 56 с.
9. Свод правил СП20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. — М., Минрегион России, 2011, 96 с.
10. Свод правил СП131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. — М., Минрегион России, 2012, 386 с.
11. Спорышев П. В., Катцов В. М., Говоркова В. А. Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу. — Труды ГГО, 2016, вып. 583, с. 45—84.
12. Торжков И. О., Кушнир Е. А., Константинов А. В., Королева Т. С., Ефимов С. В., Школьник И. М. Прогнозируемые изменения климата и их влияние на лесной сектор экономики России. — Метеорология и гидрология, 2019, № 3, с. 40—49.
13. Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А. Строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс. /В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, с. 801—830.

- 14. Хлебникова Е. И., Катцов В. М., Пикалева А. А., Школьник И. М.** Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории российской Арктики в XXI веке. — *Метеорология и гидрология*, 2018, № 6, с. 5—19.
- 15. Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М.** Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России. — *Метеорология и гидрология*, 2019, № 3, с. 11—23.
- 16. Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М.** Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений. — *Метеорология и гидрология*, 2019, № 7, с. 5—16.
- 17. Хлебникова Е. И., Салль И. А.** Экстремально низкие значения температуры воздуха на территории России и риски критических температурных воздействий на объекты инфраструктуры. — *Метеорология и гидрология*, 2018, № 6, с. 41—51.
- 18. Хлебникова Е. И., Салль И. А., Рудакова Ю. Л.** Климатические характеристики суточных максимумов температуры воздуха: ансамблевые оценки для территории России. — *Труды ГГО*, 2016, вып. 581, с. 7—23.
- 19. Хлебникова Е. И., Салль И. А., Школьник И. М.** Региональные климатические изменения как факторы влияния на объекты строительства и инфраструктуры. — *Метеорология и гидрология*, 2012, № 12, с. 19—34.
- 20. Школьник И. М., Говоркова В. А., Кароль И. Л. и др.** Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. /В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2014, с. 320—349.
- 21. Школьник И. М., Ефимов С. В.** Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии. — *Труды ГГО*, 2015, вып. 576, с. 201—211.
- 22. Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н.** Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО. — *Метеорология и гидрология*, 2012, № 2, с. 5—23.
- 23. Alexander L. V.** Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. — *Weather and Climate Extremes*, 2016, vol. 11, pp. 4—16; doi: 10.1016/j.wace.2015.10.007.
- 24. European Environmental Agency.** Impacts of Europe's Changing Climate — 2008 Indicator-based Assessment. — Joint European Environmental Agency (EEA)-Joint Research Council (JRC) — World Health Organization report. EEA Report No. 4/2008; JRC Reference Report No. JRC47756 (EEA, Copenhagen, Denmark).
- 25. Goodess C. M., Hanson C., Hulme M., and Osborn N. J.** Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models: A review of existing methods and options for development. — *Integrated Assessment*, 2003, vol. 4, No. 3, pp. 145—171.
- 26. Li G., Zhang X., Cannon A. J., Murdock T. Q., Sobie S., Zwiers F. W., Anderson K., and Qian B.** Indices of Canada's future climate for general and agricultural adaptation applications. — *Climatic Change*, 2018, vol. 148, No. 1—2, pp. 249—263; doi: 10.1007/s10584-018-2199-x.
- 27. Maraun D.** Bias correcting climate change simulations — a critical review. — *Curr. Clim. Change Rep.*, 2016, vol. 2, pp. 211—220; doi: 10.1007/s40641-016-0050-x.
- 28. Michelangeli P.-A., Vrac M., and Loukos H.** Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. — *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, L11708; doi: 10.1029/2009GL038401.
- 29. Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., and Kattsov V.** Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections. — *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, 034010; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>.
- 30. Schoof J. T. and Robeson S. M.** Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States. — *Weather and Climate Extremes*, 2016, vol. 11, pp. 28—40.
- 31. Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., and Zhuravlev S.** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario. — *Climate Dynamics*, 2018; doi: 10.1007/s00382-017-3600-6.
- 32. Sillmann J., Kharin V. V., Zhang X., Zwiers F. W., and Bronaugh D.** Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, vol. 118, pp. 2473—2493; doi: 10.1002/jgrd.50203.
- 33. Vuuren D. P. van, Edmonds J., Kainuma M., et al.** The representative concentration pathways: An overview. — *Climatic Change*, 2011, vol. 109, pp. 5—31; doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.