

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

*Н.И. Тананаев<sup>1,2\*</sup>*

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,  
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

\* [tanni@s-vfu.ru](mailto:tanni@s-vfu.ru)

### Аннотация

Адаптация к климатическим изменениям рассматривается как экономическая задача, однако в ее основе лежат климатические условия территорий и их ожидаемые изменения в среднесрочной перспективе. Цель данной статьи – определение актуальных подходов к оценке климатических рисков по данным исследований и экспертных оценок, выбору релевантных климатических переменных, прогнозированию ожидаемого (вероятного) уровня климатических рисков с помощью моделей глобального климата. В работе использованы общенаучные методы анализа, синтеза и научного обобщения. Проведен анализ существующей нормативно-правовой документации в области региональной адаптации, показана ограниченность ее требований, в первую очередь – упор на ретроспективный анализ рисков и закрытый перечень показателей, характеризующих уровень их опасности. Одной из основных задач, решение которых необходимо в процессе адаптационного планирования, является нахождение соответствия между риском и климатическими переменными, определяющими его вероятность реализации и уровень опасности. Рассмотрены подходы к определению перечня региональных климатических переменных, сведения о которых необходимы для планирования мер по адаптации, в рамках климатического либо отраслевого подхода с использованием стандартных перечней климатических переменных и индексов, формируемых Всемирной метеорологической организацией, либо на основании экспертного консенсуса. Показано, что региональный климатический прогноз – один из основных компонентов в решении задачи адаптации к изменениям климата, рассмотрены методики прогнозирования и повышения пространственной точности такого прогноза (статистический и динамический даунскейлинг). Предложенные методические подходы предназначены для использования в практике планирования региональных адаптационных мероприятий, в том числе на территории Республики Саха (Якутия), и при актуализации Стратегии социально-экономического развития РС (Я).

**Ключевые слова:** климатические изменения, климатические действия, меры адаптации, климатические проекции, региональный план адаптации, основные климатические переменные, ретроспективная оценка рисков

**Финансирование:** Исследование выполнено по плану НИР Научно-исследовательской лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов ИЕН СВФУ по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М.К. Аммосова на 2025 г. (обзор нормативно-правовой документации); в рамках программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030. Дальний Восток» (национальный проект «Наука и университеты»), реализуемой ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга» (анализ климатических переменных и прогнозов).

**Для цитирования:** Тананаев Н.И. Климатические аспекты планирования региональных мероприятий по адаптации к изменениям климата. *Вестник СВФУ*. 2025;(1):85-97. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-85-97

## CLIMATE BASIS FOR PLANNING OF REGIONAL ACTIONS FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

*Nikita I. Tananaev*<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

\* tanni@s-vfu.ru

### Abstract

Adaptation to climate change is seen as an economic task, but it is based on the climatic conditions of territories and their expected changes in the medium term. The purpose of this article is to identify relevant approaches to assessing climate risks based on research data and expert assessments, selecting relevant climate variables, and forecasting the expected (probable) level of climate risks using global climate models. The work uses general scientific methods of analysis, synthesis and scientific generalisation. The analysis of existing regulatory and legal documentation in the field of regional adaptation has been carried out, and the limitations of its requirements have been shown, primarily the emphasis on retrospective analysis of risks and a closed list of indicators characterising the level of their danger. One of the main tasks to be solved in the process of adaptation planning is to find a correspondence between risk and climatic variables that determine its probability of realisation and the level of danger. Approaches to determining the list of regional climatic variables, information about which is necessary for planning adaptation measures, within the framework of the climate or sectoral approach, using standard lists of climatic variables and indices, formed by the World Meteorological Organisation, or on the basis of expert consensus, are considered. It is shown that regional climate forecast is one of the main components in solving the problem of adaptation to climate change, and the methods of forecasting and improving the spatial accuracy of such a forecast (statistical and dynamic downscaling) are considered. The proposed methodological approaches are intended for use in the practice of planning regional adaptation measures, including in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia), and in updating the Strategy of Socio-Economic Development of the Republic of Sakha (Yakutia).

**Keywords:** climate change, climate action, adaptation measures, climate projections, regional adaptation plan, essential climate variables, retrospective risk assessment.

**Funding:** The study was carried out: under the research plan of the Climate and Ecosystems of Northern Regions Research Laboratory, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University (NEFU), according to the priority areas of the NEFU Development Programme for 2025 (regulatory analysis); within the framework of the programme of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation ‘Priority-2030. Far East’ (national project ‘Science and Universities’), implemented by Vitus Bering Kamchatka State University (analysis of climate variables and regional climate projections).

**For citation:** Tananaev N.I. Climate basis for planning of regional actions for adaptation to climate change. Vestnik of NEFU. Earth Sciences. 2025;(1):85-97. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-85-97

### Введение

Наблюдаемые климатические изменения имеют глобальный характер [1] и одновременно – выраженное региональное измерение [2], в котором для отдельных территорий характерен определенный набор изменяющихся климатических показателей, интенсивность их изменения, а также вклад изменения каждого показателя (или их группы) в совокупный эффект для социально-экономической системы, чаще всего негативный [3].

Оценки совокупного эффекта глобальных климатических изменений неопределенны как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе [3]. Некоторые экономические модели оценивают его как положительный [4], такие оценки существуют и для территории Российской Федерации [5]. Тем не менее, актуальный мета-анализ экономических импакт-моделей указывает на отрицательный эффект изменений климата для мировой экономики [4], для подавляю-

щего большинства стран мира в долгосрочной перспективе [6], для регионов со слабым развитием демократических институтов и высоким уровнем неравенства [3].

Климатические действия, в которые государства вовлечены через механизмы Парижского соглашения, направлены на снижение негативного социально-экономического эффекта глобальных изменений и способны это сделать [7]. Климатические действия включают: мероприятия по митигации, сокращению промышленных выбросов парниковых газов и природной эмиссии, увеличивающейся вследствие естественной или антропогенной трансформации экосистем; мероприятия по адаптации к климатическим изменениям, направленные на повышение устойчивости экономики и общества в ближайшей и отдаленной перспективе [8]. Необходимость разработки и внедрения адаптационных мер на национальном и субнациональном уровне в Российской Федерации регулируется рядом документов стратегического планирования [9].

Адаптационное планирование рассматривается в существующей литературе как экономический процесс, либо как управленческая задача [10], однако оно основано на тесном взаимодействии между управленческими и научными институтами [11]. В данной статье задача адаптации рассматривается с точки зрения климатической науки, как задача получения и использования климатических данных в качестве инструмента поддержки и научного обоснования в процессе планирования адаптационных мероприятий на уровне регионов, что заполняет указанный пробел в литературе. В статье рассмотрены актуальные подходы к оценке климатических рисков по данным исследований и экспертным оценкам, подходы к определению и расчету релевантных климатических переменных, особенности прогнозирования их изменений.

### **Материалы и методы**

Основными материалами для исследования послужила актуальная нормативно-правовая база на национальном и субнациональном уровне, регулирующая адаптационное планирование в российских регионах, а также массив сведений об основных климатических переменных и современных источниках климатических данных. В работе использованы общенаучные методы анализа, синтеза и научного обобщения.

### **Результаты и обсуждение**

*Постановка проблемы.* Основная цель регионального адаптационного планирования – формирование комплекса мероприятий в рамках полномочий региона, направленных на минимизацию негативных последствий и наиболее эффективное использование позитивных аспектов (возможностей), связанных с климатическими изменениями. Планирование включает несколько этапов, каждый из которых должен быть обеспечен климатической информацией: (1) установление современного уровня опасности климатических рисков, а при возможности – прогнозного уровня; (2) определение потребностей региона в адаптационных мерах в контексте конкретных климатических рисков; (3) разработка комплекса мероприятий, закрывающих потребности, по возможности – достигая максимального эффекта при минимальных затратах; (4) оценка возможностей, открывающихся в результате изменений климата, и разработка комплекса мероприятий, направленных на реализацию данных возможностей.

Определение структуры климатических рисков для региона и уровня их опасности – ключевой момент регионального адаптационного планирования. Перечень климатических рисков должен быть релевантным для региона, с учетом его природно-климатических условий и специфики социально-экономического развития, в том числе внутрирегионального многообразия. Последнее особенно важно для регионов Сибири и Дальнего Востока РФ, имеющих значительные размеры и огромное разнообразие геосистем.

*Климатические риски и уровень их опасности.* Климатический риск (КР), как и иные виды рисков, может быть оценен количественно в системе координат «вероятность – ущерб», но такой подход применим для объектовых расчетов, а не для региональных обобщений. Уровень опасности КР в рамках адаптационного планирования в РФ оценивается по единому для регионов набору показателей согласно утвержденным методическим рекомендациям (Приказ

Минэкономразвития РФ от 13.05.2021 г. № 267, дополнены Приказом Минэкономразвития РФ от 28.12.2023 г. № 928). Данная работа выполняется единообразно во всех регионах, которые сталкиваются в ней со сходными затруднениями.

1. Перечень климатических рисков – закрытый, включает 26 рисков, взятых обобщенно, без детализации. Например, п. 20 «Засуха» взят без расшифровки по типу засухи (почвенная, атмосферная, гидрологическая). Атмосферная и почвенная засуха – опасные агрометеорологические явления, сведения о которых могут быть почерпнуты из бюллетеней региональных управлений Росгидромета; гидрологическая засуха имеет свои критерии, но не относится к опасным явлениям (ОЯ), и ее повторяемость оценивается в рамках научных исследований [12]. Некоторые риски традиционно относятся к опасным экзогенным процессам (оползни, сели, лавины), в развитии которых вклад климатических факторов не всегда очевиден.

2. Оценка уровня опасности опирается на ретроспективный анализ КР – за предшествующий период продолжительностью не менее 10 лет, согласно Приказу № 267. Ретроспективный анализ рисков делает акцент на ранее реализованных рисках и нанесенном ущербе, что упрощает планирование и приоритизацию адаптационных мероприятий с допущением, что структура рисков не изменится на горизонте планирования. По ряду причин такой подход является спорным. Во-первых, экстремальные события редкой повторяемости, наносившие значимый ущерб за временным горизонтом ретроспекции, могут быть не учтены в таком анализе; в то же время известно, что вероятность таких событий возрастает в климате будущего [13]. Во-вторых, неясно, целесообразно ли адаптироваться к существующему климату и его уровню КР, если известно, что он будет изменяться как минимум на протяжении нескольких десятилетий. В-третьих, определение прогнозного уровня КР опционально, вследствие чего недоучитывается возможность актуализации одних и дезактуализации других КР в климате будущего. Например, риск экстремальных снегопадов на юго-востоке Камчатского края, как ожидается, сменится риском заморозков и экстремальных дождей. Приказом № 267 предусматривается использование климатических прогнозов, в том числе предоставляемых Климатическим центром ГГО им. А.И. Воейкова. Данный прогноз изменения средней температуры воздуха и суммы осадков может иметь ценность, если к данным значениям будут привязаны конкретные показатели риска. В ином случае требуется анализ данных климатического моделирования, однако соответствующие научные школы есть далеко не во всех регионах.

3. Оценка уровня опасности КР затрудняется неопределенностью количественных критериев, перечень которых установлен Приказами № 267 и № 928. Для большинства КР основным показателем уровня опасности КР установлена «Подверженность территории, %». Неясно, учитывается ли здесь общая площадь субъекта РФ, ее хозяйственно-освоенная часть, или иные показатели подверженности. С увеличением площади субъекта РФ данный критерий значительно размывается. Так, по риску 17 «Наводнение» очевидно, что для большинства регионов подверженность наводнением их общей площади не превышает 10 %, что соответствует «умеренно опасному» уровню, а для Республики Саха (Якутия), региона общей площадью свыше 3 млн. км<sup>2</sup> – не превышает долей процента. Тем не менее, наводнения – наиболее опасное природное явление, занимающее первое место в структуре ущербов региона. Объективно установить уровень опасности данного риска возможно через отношение количества населенных пунктов, для которых официально установлены границы зон затопления (123), к количеству населенных пунктов, расположенных в речных долинах (около 200). Определенная таким методом подверженность превышает 50 %, что соответствует объективному «катастрофическому» уровню опасности.

Уровень опасности КР не увязан априорно с уровнем возможных последствий (ущербов), которые в отношении региональных климатически-уязвимых объектов оцениваются отдельно, в ретроспекции. Как следствие, например, уровень опасности риска «Жара», взятого без уточнений, о каком аспекте жары идет речь, определяется только долей подверженной данному

рisku территории региона. Он никак не увязан с возможными последствиями для социально-экономической системы, например, с избыточной смертностью [14] или нагрузкой на энергосистемы и возрастающей вероятностью аварий [15]. Статистика избыточных смертей или перерывов в электроснабжении, обусловленных жарой, может отсутствовать в регионе, как и монетарная оценка ущерба, связанного с этими эффектами. В результате, адаптация систем здравоохранения и энергоснабжения к увеличению температур воздуха и продолжительности периодов жары не будет обозначена как адаптационная потребность региона, и соответствующие мероприятия не будут включены в региональный план адаптации. Обобщенный в данном случае наносится не только и не столько конкретным климатически-уязвимым объектам, а экономике региона в целом, поскольку избыточная смертность, например, может иметь множественные реперкуссии в экономической системе: потеря объемов производительного труда, потеря налоговой базы для регионального налогообложения, а в случае смерти людей старшего возраста – возможная потеря естественного прироста вследствие демотивации родителей (старшее поколение играет роль «заместительных родителей»).

Уровень опасности КР при данном подходе также практически не имеет привязки к конкретным климатическим переменным, несмотря на то, что именно их значения определяют подверженность региона тому или иному риску, а также вероятный размер ущерба, особенно при реализации комплексного риска [16]. Определение регионального перечня климатических переменных, соответствующих основным КР, оценка их современных и будущих значений – научная задача, решение которой требует определенных профессиональных навыков.

Следует понимать, что при значительном внутрорегиональном разнообразии природно-климатических условий один тип риска может определяться разным сочетанием синоптических факторов в разных районах. К примеру, риск «Наводнение» реализуется в весенне-летний период в среднем течении р. Лена и центральной Якутии, что связано в основном с заторными явлениями, и в летне-осенний период – на горных и полугорных реках в верховьях бассейна р. Яна и ее притоков, в результате дождевых паводков. Вероятность наводнения в этих районах определяется разным сочетанием факторов, для каждого из которых необходимо определить конкретные переменные, его характеризующие: например, максимальный суточный слой осадков для дождевых паводков; сумма отрицательных зимних температур, слой зимних осадков и сумма положительных температур начала весны – для весеннего половодья [17]. Таким образом, задача состоит в нахождении соответствия между риском и климатическими переменными, определяющими его вероятность реализации и уровень опасности.

*Климатические переменные для планирования адаптации.* Глобальные изменения климата охватывают комплекс взаимосвязанных процессов и явлений в земной системе. В процессе регионального проектирования мер адаптации они должны получить научно-обоснованную количественную определенность: какой параметр изменяется, в каком направлении и с какой интенсивностью; каково влияние изменений данного параметра на социально-экономическую систему и ее отдельные элементы (отрасли).

Климат есть ансамбль (статистическое обобщение) состояний погоды на заданном пространственном и временном масштабах [18]. Климатическая переменная – любая характеристика параметров состояния климатической системы на выбранном пространственном и временном масштабах, определенная в терминах средних, экстремумов, дисперсии, повторяемости и обеспеченности. Климатические изменения описываются через значения температуры воздуха в приземном слое и суммы атмосферных осадков, в первую очередь по причине того, что эти величины измеряются на глобальной сети метеорологических станций. Однако другие, производные показатели могут более детально характеризовать конкретные явления: волны жары (продолжительность стояния среднесуточной температуры воздуха выше  $+30^{\circ}\text{C}$ ), интенсивность морозного выветривания (количество переходов через  $0^{\circ}\text{C}$ ), повышенный уровень загрязненности атмосферы (количество дней с неблагоприятными условиями атмосферной циркуляции).

Привязка климатических показателей к доступным данным наблюдений на метеорологических станциях порождает ряд затруднений. Во-первых, возникает проблема пространственного масштаба: наблюдения характеризуют только некоторую окрестность точки расположения станции, тогда как риски могут проявляться за пределами этой окрестности, что приводит к необходимости использования данных реанализа. Во-вторых, некоторые критически значимые показатели риска, например, показатели потенциала конвективных явлений, в частности, развития мощных грозных очагов: доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE, convective available potential energy) и другие индексы определяются по аэрологическим данным, которые измеряет не каждая станция. Следовательно, данные показатели могут определяться только по данным модельных климатических реанализов. В-третьих, точечные данные наблюдений не могут быть напрямую поставлены в контекст климатических проекций, основанных на данных сценарного моделирования, для этого необходимо применять регрессионный анализ либо использовать данные реанализов в качестве «базового климата».

Ключевую роль в определении регионального перечня климатических переменных играет обеспеченность исходными данными; их отсутствие не позволяет оперировать конкретными значениями переменных. В настоящее время существует обилие массивов климатической информации, полученных из разных источников, с различными уровнями точности и неопределенности [19]. С практической точки зрения целесообразным выглядит использование следующих подходов:

1. Основные климатические переменные (ECV, essential climate variable). Всемирная метеорологическая ассоциация (ВМО) сформировала список из 55 основных климатических переменных (ОКП), сгруппированных в три домена: атмосфера (приземный слой, свободная атмосфера, химический состав), океан (приповерхностная физика, глубоководная физика, экосистемы океана, биогеохимия), суша (гидросфера, биосфера, криосфера, антропосфера). Преимущество использования ОКП заключается в систематической работе коллективов, входящих в Глобальную систему наблюдений за климатом (ГСНК), по формированию массивов геоданных, характеризующих состояние каждой ОКП. Эти данные могут быть использованы как опорные при разработке климатического прогноза. Например, для переменной «Расход воды» поддерживаются глобальные базы гидрологических данных RivDIS [20], GRDC [21]. Официальные данные ВМО при необходимости могут быть интегрированы с другими массивами данных, опирающихся на другие методы, например, FLO1K [22], RADR [23], данные климатического моделирования.

2. Климатические индексы ClimPACT [24]. Перечень сформирован Группой экспертов по секторальным климатическим индексам ВМО (ET-SCI, Expert Team on Sector-specific Climate Indices), и включает 63 индекса. Для каждого индекса указана его применимость в одной или нескольких отраслях: здравоохранение, сельское хозяйство и продовольственная безопасность, водные ресурсы и продовольственная безопасность, берега, снижение риска катастроф, энергетика, рыбное хозяйство, лесное хозяйство и эмиссия парниковых газов, криосфера. Группой разработано прикладное программное обеспечение для расчета индексов по данным метеостанций или регулярным сеткам.

3. Экспертный отбор климатических параметров. Обширная работа, проделанная в рамках двух перечисленных выше проектов, может потребовать усилий эксперта по отбору наиболее релевантных переменных (индексов) из пула имеющихся, либо определению других переменных, не вошедших в перечни ОКП или ClimPACT, но необходимых для региональной оценки КР. Пример: количество переходов через 0°C, которое определяет интенсивность морозного выветривания и его влияния на инженерные сооружения, но также характеризует вероятность гололедицы, опасность дорожно-транспортных происшествий и травм у пешеходов.

Очевидно, что не все климатические переменные имеют практическое значение с точки зрения планирования адаптационных мероприятий во всех регионах. Данные об обилии фито-

планктона или концентрации биогенных элементов, скорее всего, незначимы для Республики Саха (Якутии), но могут быть необходимы для прогноза развития рыбной популяции Камчатского края. По этой причине необходим экспертный отбор переменных на уровне региона, затем – разработка прогноза по выбранным переменным. Такой отбор может осуществляться двумя путями.

Климатический подход опирается на априорный подбор переменных (индексов) на основании ретроспективного анализа и пула экспертных оценок. Рассматриваются ОКП и их производные, для каждой теоретически моделируется возможное влияние на экосистемы, население и экономику региона. В случае высокой значимости динамика такой климатической переменной (индекса) исследуется детально. При необходимости – создается региональный долгосрочный прогноз ее изменения, который используется для планирования адаптации одной или нескольких отраслей. Например, увеличение числа дней летнего периода со штормовыми ветрами на юге Камчатского края равно неблагоприятно повлияет и на туристический бизнес, который будет ограничивать морские выходы и вертолетные туры, и на рыбный промысел, где промысловикам необходимо будет вставать в простой либо менять тип промыслового судна. Принятие решений в каждой отрасли на основе полученной информации – отдельный, независимый процесс. Из более широких соображений, возможно, удастся показать, что изменение показателя летней штормовой активности у берегов Камчатки связано с выходом тропических циклонов во внутритропическую область в Северной Пацифике, развитием «взрывного» циклогенеза или иными факторами, однако эти результаты имеют скорее научный, чем прикладной интерес.

Отраслевой подход опирается на запрос конкретных отраслей или приоритетных адаптантов. Для сельского хозяйства это может быть сумма биологически-активных температур, для речного транспорта – повторяемость уровня воды ниже проектных отметок, для строительства – глубина сезонного протаивания. Перечень отраслевых климатических показателей также может определяться экспертным опросом среди представителей отрасли. При таком подходе изменение той или иной переменной также можно связать с конкретными обстоятельствами; рост пожарной опасности в лесах, или снижение уровня воды ниже проектной отметки в среднем и нижнем течении р. Лена можно связать с особенностями циклональной циркуляции летнего периода в центральной и южной Якутии [25].

Оптимальным методом анализа в обоих подходах представляются матричные решения, сходные с приведенным в [26], построенные совместно относительно климатических переменных и последствий влияния/изменения. Где возможно, такие решения должны содержать не только современные, но и прогнозные оценки секторального влияния изменения той или иной климатической переменной [27].

*Региональный климатический прогноз.* Глобальные климатические модели проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, фаза 6) содержат данные об изменении параметров состояния климатической системы Земли на период до 2100 г. в основных сценариях социально-экономического развития планеты [28]; эти данные находятся в открытом доступе. Как источник данных, глобальные климатические модели (ГКМ) неоднородны и сложны для ассимиляции в процессы принятия решений.

В проекте ScenarioMIP участвуют более 30 моделей [29], их пространственное разрешение варьирует от 50 до 500 км, с каждой моделью ассоциируются свои неопределенности, которые снижаются с использованием ансамблевого подхода. Региональные ансамбли климатических моделей, наилучшим образом воспроизводящих современный климат территории, позволяют оценить ожидаемые изменения в основных климатических сценариях, а использование реанализов в качестве «базового климата» повышает точность таких проекций [30]. Удобство такого подхода состоит в возможности оценить изменения любой выбранной переменной по заранее ограниченному кругу моделей, без предварительного анализа, с допущением, что отобранные модели воспроизводят эти переменные так же хорошо, как и среднегодовую температуру воздуха.

Предположение, что модели, точнее прочих воспроизводящие изменения одной климатической характеристики, будут равно точны в воспроизведении (и прогнозе) других климатических характеристик, спекулятивно; известно, например, что глобальные климатические модели воспроизводят поля осадков значительно менее точно, чем поля температуры воздуха [31]. Допущение, что ансамбль, «успешный» по одной климатической переменной, будет достаточно точным и в отношении других переменных, относится к таким же общепринятым, как и допущение, что модели, успешно воспроизводящие современный климат, будут успешными и в прогнозе, что также не гарантировано. Оба эти допущения широко применяются в климатическом прогнозировании, в том числе для целей адаптации [32].

Повысить пространственное разрешение позволяют методы статистического и динамического даунскейлинга. Статистические методы позволяют увеличить пространственное разрешение до 1 км, но снижают временное разрешение до уровня климатических норм [33], а также сами вносят значительную неопределенность в региональные климатические проекции [34]. Динамический даунскейлинг, или региональное климатическое моделирование, позволяет увеличить пространственное разрешение до 2 км, пользуясь гидродинамическими подходами. Опубликованы результаты сценарного регионального моделирования на территорию Северной Евразии с разрешением 25 км с помощью региональной модели Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [27], воспроизводящие, в том числе некоторые индексы программы ClimPACT.

Региональные климатические проекции играют важную роль в оценке будущей опасности климатических рисков, когда установлен переход от значений отдельных климатических переменных или их комплекса к оценке уровня риска. Для некоторых характеристик уровня риска, например, средняя площадь одиночного оврага или средний диаметр карстовых воронок, нахождение прямой связи с климатическими переменными затруднительно.

Некоторые показатели риска, например, комплексный показатель В.Г. Нестерова (пожарной опасности в лесах) [35], жара и засуха, возврат холодов в вегетационный период (заморозки), определяются через характеристики погодных условий, исходные данные суточного разрешения. Комплексный показатель В.Г. Нестерова определяется по данным о температуре воздуха, температуре точки росы в 12 ч местного времени, сумме осадков (свыше 2.5 мм) за предшествующие 24 часа. Климатические модели CMIP6 не содержат информации о температуре точки росы, этот параметр требуется рассчитывать отдельно, по данным о температуре воздуха и относительной влажности, однако принципиально такой прогноз возможен – с оговоркой, что точность моделей в суточном разрешении может быть сравнительно низка. Достоверность расчета во многом определяется точностью прогноза длительности периода без дождей; при создании прогноза пожарной опасности предварительно следует проверить на исторических данных сходимость модельных и наблюдаемых эмпирических распределений максимальной продолжительности периода без дождей. Для территорий с редкой сетью метеорологических станций необходимо также проверять, что этот показатель с достаточной точностью воспроизводится климатическим реанализом или выбранным спутниковым продуктом.

Региональные климатические проекции, основанные на глобальных или региональных моделях, имеют важное преимущество для крупных субъектов РФ: при пространственном разрешении прогнозных данных  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  по широте и долготе (и лучше) они позволяют дифференцировать территорию региона по интенсивности изменений и уровню опасности климатических рисков на уровне отдельных муниципальных образований. Основные риски на территории Республики Саха (Якутии) – лесные пожары, деградация верхних горизонтов многолетней мерзлоты – распределены по территории региона неравномерно, и пространственно-распределенная информация позволит учесть эту неравномерность при приоритизации мер адаптации.

### Заключение

Адаптация к изменениям климата рассмотрена в данной работе через призму климатических переменных и подходов, определяющих их связь с уровнем опасности климатических рисков. Целесообразность адаптационных мероприятий нередко оценивается монетарными критериями, например, по соотношению между понесенными расходами и потенциальным избежанным ущербом; оценить это соотношение без использования климатических данных невозможно. При определении уровня необходимых инвестиций в объекты инженерной защиты территорий необходимо использовать климатические прогнозы (проекции), поскольку эти объекты должны обеспечивать проектный уровень безопасности территории в течение всего срока эксплуатации.

Современный алгоритм разработки адаптационных мероприятий, как представляется, основан на признании факта, что современная социально-экономическая система не адаптирована даже под существующий уровень опасности климатических рисков. Ретроспективный подход к определению уровня опасности рисков не позволяет судить об их будущем уровне и ожидаемых ущербах, особенно в долгосрочной перспективе, на горизонте нескольких десятилетий. В то же время прогноз изменения климатических характеристик – один из основных компонентов в задаче планирования адаптационных мероприятий.

Стохастический характер климатической системы ставит перед региональными органами власти и представителями ключевых отраслей экономики задачи планирования работы коммунальных структур и экономической системы, отличные от решаемых ранее. Современные индустрии «привыкли» к климату настоящего, и отдельные годы, сильно отличающиеся по погодным условиям от среднего (бесснежные зимы, влажное лето) нарушают их нормальное функционирование. В климате будущего сильно отличающиеся годы станут нормой, и смена экономической модели на более подходящую (например, в туристской отрасли – автотуры вместо туров на снегоходах, смена маршрутных предложений) – адекватный адаптационный ответ. Не следует забывать, однако, что в отдельные годы погода может, тем не менее, возвращаться к историческим нормам. Повышение устойчивости индустрии к таким возвратам и в целом к росту вероятности экстремальных погодных явлений – также часть адаптационного процесса, которая должна быть учтена регионами в документах адаптационного планирования.

### Литература

1. Sippel S., Meinshausen N., Fischer E.M. et al. Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. *Nature Climate Change*. 2020;10:35–41. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0666-7>.
2. Collins M., Beverley J.D., Bracegirdle T.J. et al. Emerging signals of climate change from the equator to the poles: new insights into a warming world. *Frontiers in Science*. 2024;2:1340323. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1340323>.
3. Meierrieks D., Stadelmann D. Is temperature adversely related to economic development? Evidence on the short-run and the long-run links from sub-national data. *Energy Economics*. 2024;136:107758. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107758>.
4. Tol R.S.J. A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy*. 2024;185:113922. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>.
5. Экономические эффекты климатических изменений в России: анализ рисков и возможностей для устойчивого развития страны / Центр «Климатическая политика и экономика России» ИНИП РАН. М.: ИНИП РАН, 2024. – 12 с.
6. Kahn M.E., Mohaddes K., Ng R.N.C. et al. Long-term macroeconomic effects of climate-change: Cross-country analysis. IMF Working Paper WP/19/215. International Monetary Fund; 2019:58.
7. Mann, M.E. Warming ends when carbon pollution stops. *Frontiers in Science*. 2023;1:1256273. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1256273>.
8. Климатическая доктрина Российской Федерации (утверждена Указом Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812), 21 с.

9. Задорин М.Ю. Обзор международных стандартов и российского законодательства по климатической адаптации. *Арктика и Север*. 2023;(53):273–290. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.53.273>
- Zadorin M.Yu. Overview of International Standards and Russian Legislation on Climate Change Adaptation. *Arktika i Sever*. 2023;(53):273–290. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.53.273> (in Russian).
10. Молчанова Я.П., Гусева Т.В., Малков А.В. и др. Адаптация к изменению климата как элемент планирования: возможность применения европейского опыта для г. Москва. *Вестник РХТУ им. Д. И. Менделеева. Гуманитарные и социально-экономические исследования*. 2017;(8-2):163–171.
11. Булавинова М.П. Концептуальные подходы в исследованиях адаптации к изменениям климата (обзор). *Научно-исследовательские исследования*. 2023;(2):132–154.
12. Владимиров А.В. Классификация гидрологических засух. *Ученые записки РГГМУ*. 2012;(23):5–12.
13. Fischer E.M., Sippel S., Knutti R. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*. 2021;11:689–695. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01092-9>.
14. Lüthi S., Fairless C., Fischer E.M. et al. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications*. 2023;14:4894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x>.
15. Liang J., Qiu Y. (L.), Wang B. et al. Impacts of heatwaves on electricity reliability: Evidence from power outage data in China. *iScience*. 2025;28(1):111855. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.111855>.
16. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / под редакцией В. М. Катцова. – СПб.: ФГБУ «ГГО», 2017. – 106 с.
17. Тананаев Н.И., Находкин Н.А., Голованов А.О. Природные факторы возникновения наводнений в среднем течении р. Амга, Центральная Якутия. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. 2022;3(27):61–75. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.27.3.006>.
18. Дымиников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Проблемы моделирования климата и его изменений. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2006;42(5):618–636.
19. Merchant C.J., Paul F., Popp T. et al. Uncertainty information in climate data records from Earth observation. *Earth System Science Data*. 2017;9(2): 511–527. <https://doi.org/10.5194/essd-9-511-2017>.
20. Vörösmarty C.J., Fekete B., Tucker B.A. Global River Discharge, 1807-1991, V. 1.1 (RivDIS). ORNL DAAC, Oak Ridge Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/199>.
21. Global Runoff Data Centre. Federal Institute of Hydrology, Koblenz, Germany. URL: <https://portal.grdc.bafg.de/applications/public.html?publicuser=PublicUser>.
22. Barbarossa V., Huijbregts M.A.J., Beusen A.H.W. et al. FLO1K, global maps of mean, maximum and minimum annual streamflow at 1 km resolution from 1960 through 2015. *Scientific Data*. 2018;5:180052. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.52>.
23. Feng D., Gleason C.J., Lin P. et al. Recent changes to Arctic river discharge. *Nature Communications*. 2021;12:6917. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27228-1>.
24. Zhang X., Alexander L., Hegerl G.C. et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*. 2011;2(6):851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.
25. Игнатьева Ю.И., Тананаев Н.И. Повторяемость циклонов над территорией Республики Саха (Якутия) в летние месяцы. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. 2024;(2):46–53. <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2024-2-46-53>.
26. Дьяков М.Ю., Михайлова Т.Р. Актуальные вопросы климатической адаптации Камчатского края. *Научные труды ВЭО России*. 2024;247:390–414. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2024-247-3-390-414>.
27. Катцов В.М., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. и др. Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации. *Метеорология и гидрология*. 2020;(5):46–58.
28. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016;9(9):3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
29. Tebaldi C., Debeire K., Eyring V. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*. 2021;12(1):253–293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.
30. Tananaev N.I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. *Polar Science*. 2024;41:101066. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101066>.
31. Crawford J., Venkataraman K., Booth J. Developing climate model ensembles: A comparative case study. *Journal of Hydrology*. 2019;568: 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.054>.

32. Yilmaz B., Aras E., Nacar S. A CMIP6-ensemble-based evaluation of precipitation and temperature projections. *Theoretical and Applied Climatology*. 2024;155:7377–7401. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05066-7>.
33. Mahony C.R., Wang T., Hamann A. et al. A global climate model ensemble for downscaled monthly climate normals over North America. *International Journal of Climatology*. 2022;42(11):5871–5891. <https://doi.org/10.1002/joc.7566>.
34. Lafferty D.C., Sriver R.L. Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2023;6:158. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00486-0>.
35. ГОСТ Р 22.1.09-99 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Москва: Госстандарт России; 2000:8.

### References

- Sippel S., Meinshausen N., Fischer E.M. et al. Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. *Nature Climate Change*. 2020;10:35–41. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0666-7>.
- Collins M., Beverley J.D., Bracegirdle T.J. et al. Emerging signals of climate change from the equator to the poles: new insights into a warming world. *Frontiers in Science*. 2024;2:1340323. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1340323>.
- Meierrieks D., Stadelmann D. Is temperature adversely related to economic development? Evidence on the short-run and the long-run links from sub-national data. *Energy Economics*. 2024;136:107758. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107758>.
- Tol R.S.J. A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy*. 2024;185:113922. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>.
- Economic Effects of Climate Change in Russia: Analysing Risks and Opportunities for Sustainable Development of the Country. Moscow: INP RAS; 2024:12 (in Russian).
- Kahn M.E., Mohaddes K., Ng R.N.C. et al. Long-term macroeconomic effects of climate-change: Cross-country analysis. IMF Working Paper WP/19/215. International Monetary Fund; 2019:58.
- Mann, M.E. Warming ends when carbon pollution stops. *Frontiers in Science*. 2023;1:1256273. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1256273>.
- Climate Doctrine of the Russian Federation (approved by Presidential Decree No. 812 of 26 October 2023), 21 p. (in Russian).
- Zadorin M.Yu. Overview of International Standards and Russian Legislation on Climate Change Adaptation. *Arktika i Sever*. 2023;(53):273–290. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.53.273> (in Russian).
- Molchanova Y.P., Guseva T.V., Malkov A.V. et al. Adaptation to climate change as a planning element: the possibility of applying European experience for the city of Moscow. *Bulletin of D.I. Mendeleev Russian Chemical Technology University. Humanitarian and socio-economic studies*. 2017;(8-2):163-171.
- Bulavinova M.P. Conceptual approaches in climate change adaptation research (review). *Naukovedcheskie issledovaniya*. 2023;(2):132-154 (in Russian).
- Vladimirov A.V. Classification of hydrological droughts. *Uchenye zapiski RSHMU*. 2012;(23):5-12 (in Russian).
- Fischer E.M., Sippel S., Knutti R. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*. 2021;11:689–695. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01092-9>.
- Lüthi S., Fairless C., Fischer E.M. et al. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications*. 2023;14:4894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x>.
- Liang J., Qiu Y. (L.), Wang B. et al. Impacts of heatwaves on electricity reliability: Evidence from power outage data in China. *iScience*. 2025;28(1):111855. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.111855>.
- Report on climate risks on the territory of the Russian Federation (edited by V.M. Kattsov). Saint-Petersburg: Main Geophysical Observatory; 2017:106 (in Russian).
- Tananaev N.I., Nakhodkin N.A., Golovanov A.O. Natural drivers of high floods in the middle reach of the Amga River, Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2022;(3):61-75 (in Russian). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.27.3.006>.
- Dymnikov V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. Problems of Modelling the Climate and its Changes. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauki. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006;42(5):618-636 (in Russian).

19. Merchant C.J., Paul F., Popp T. et al. Uncertainty information in climate data records from Earth observation. *Earth System Science Data*. 2017;9(2): 511–527. <https://doi.org/10.5194/essd-9-511-2017>.
20. Vörösmarty C.J., Fekete B., Tucker B.A. Global River Discharge, 1807-1991, V. 1.1 (RivDIS). ORNL DAAC, Oak Ridge Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/199>.
21. Global Runoff Data Centre. Federal Institute of Hydrology, Koblenz, Germany. URL: <https://portal.grdc.bafg.de/applications/public.html?publicuser=PublicUser>.
22. Barbarossa V., Huijbregts M.A.J., Beusen A.H.W. et al. FLO1K, global maps of mean, maximum and minimum annual streamflow at 1 km resolution from 1960 through 2015. *Scientific Data*. 2018;5:180052. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.52>.
23. Feng D., Gleason C.J., Lin P. et al. Recent changes to Arctic river discharge. *Nature Communications*. 2021;12:6917. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27228-1>.
24. Zhang X., Alexander L., Hegerl G.C. et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*. 2011;2(6):851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.
25. Ignatyeva Y.I., Tananaev N.I. Recurrence of cyclonic events over the Sakha Republic (Yakutia) in summer months. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2024;(2):46-53 (in Russian). <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2024-2-46-53>
26. Dyakov M.Yu., Mikhailova T.R. Actual issues of climatic adaptation of the Kamchatka Territory. *Scientific Proceedings of the All-Russia Economic and Economic Organisation of Russia*. 2024;247:390–414. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2024-247-3-390-414>.
27. Kattsov V.M., Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M. et al. Probabilistic scenario forecasting of regional climate as a basis for the development of adaptation programmes in the economy of the Russian Federation. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;(5):46-58.
28. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016;9(9):3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
29. Tebaldi C., Debeire K., Eyring V. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*. 2021;12(1):253–293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.
30. Tananaev N.I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. *Polar Science*. 2024;41:101066. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101066>.
31. Crawford J., Venkataraman K., Booth J. Developing climate model ensembles: A comparative case study. *Journal of Hydrology*. 2019;568: 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.054>.
32. Yilmaz B., Aras E., Nacar S. A CMIP6-ensemble-based evaluation of precipitation and temperature projections. *Theoretical and Applied Climatology*. 2024;155:7377–7401. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05066-7>.
33. Mahony C.R., Wang T., Hamann A. et al. A global climate model ensemble for downscaled monthly climate normals over North America. *International Journal of Climatology*. 2022;42(11):5871–5891. <https://doi.org/10.1002/joc.7566>.
34. Lafferty D.C., Srivier R.L. Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2023;6:158. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00486-0>.
35. GOST R 22.1.09-99 Safety in emergency situations. Monitoring and forecasting of forest fires. Moscow: Gosstandart of Russia; 2000:8.

#### Об авторе

**ТАНАНАЕВ Никита Иванович**, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова; ведущий научный сотрудник, Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга; ORCID: 0000-0003-2997-0169, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: [tanni@s-vfu.ru](mailto:tanni@s-vfu.ru)

#### About the author

**Nikita I. TANANAEV**, Cand. Sci. (Geography), Laboratory Head, Associate Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; Leading Researcher, Vitus Bering Kamchatka State University; ORCID:

0000-0003-2997-0169, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

***Вклад авторов***

**Тананаев Н.И.** – разработка концепции, программное обеспечение, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, получение финансирования

***Authors' contribution***

**Tananaev N.I.** – conceptualization, software, validation, formal analysis, investigation, data curation, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, funding acquisition

***Конфликт интересов***

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

***Conflict of interests***

The authors declare no conflict of interest

*Поступила в редакцию / Submitted 03.03.2025*

*Принята к публикации / Accepted 10.03.2025*