

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ, АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

© 2024 г. В.А. Семенов^{a,b,*}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 27.02.2024 г.

Изменение климата — одна из важнейших междисциплинарных проблем XXI столетия, охватывающая экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации. В статье рассматриваются основные факторы глобальных изменений климата, их особенности и последствия на территории России. Автор формулируются актуальные задачи науки о климате на ближайшие годы и десятилетия, предлагаются важные шаги по их решению. Статья основана на материалах доклада, представленного автором на Общем собрании РАН 12 декабря 2023 г.

Ключевые слова: изменения климата, причины изменений климата, последствия изменений климата, актуальные задачи климатологии.

DOI: 10.31857/S0869587324030076, EDN: GGRFJR

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ИХ ОСОБЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Климат Земли быстро меняется на протяжении последнего столетия. С начала XX в. глобальная приповерхностная температура воздуха выросла на 1.2°C [1]. При этом над сушей изменения происходят примерно в 2 раза быстрее, чем над океанами, что связано с большей тепловой инерцией океанов и переносом водяного пара с них на континенты [2]. Современные значения глобальной температуры рекордно высоки за как минимум последние 2000 лет согласно данным палереконструкций [3, 4]. Принципиально важно, что наблюдаемые за последние

100 лет темпы роста температуры в несколько раз превышают скорость изменений климата за аналогичные промежутки времени во втором тысячелетии нашей эры. Стоит отметить, что основной прирост температуры пришёлся на последние десятилетия, только за 1976–2020 гг. глобальная температура выросла на 0.8°C [1]. Особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где за 30 лет (1991–2020) рост среднегодовой температуры составил 2.6°C.

Глобальное потепление сопровождается подъёмом уровня океана (на 20 см с 1901 г.) вследствие термического его расширения и таяния ледников суши. При этом темпы подъёма уровня океана в конце XX в. ускорились почти в 2 раза по сравнению с предшествующими десятилетиями, с начала 1990-х годов уровень поднялся более чем на 9 см [1]. В летний период резко сокращается площадь арктических морских льдов (примерно на 12% за десятилетие на протяжении последних 40 лет) [5]. В результате наблюдаемая в сентябре площадь арктических морских льдов сократилась почти в 2 раза относительно значений конца 1970-х годов, что, по всей видимости, беспрецедентно за последние 400 лет [6]. Значимо уменьшается объём большинства горных ледников [7], растёт температура верхнего слоя многолетней мерзлоты и глубина её



СЕМЕНОВ Владимир Анатольевич — академик РАН, заместитель директора Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

сезонного протаивания [8]. Вследствие изменений градиентов температуры и солёности, областей нагрева и охлаждения атмосферы и океана трансформируется характер циркуляции последних.

При потеплении климата увеличивается число экстремальных погодных явлений [9]. Повышение средней приземной температуры воздуха и изменения атмосферной циркуляции приводят к росту частоты и интенсивности волн жары в атмосфере практически во всех регионах планеты, на суше подобные явления сопровождаются засухами и природными пожарами [1, 10]. Увеличивается количество осадков и влагоёмкость атмосферы, что приводит к повышению интенсивности осадков над сушей и в целом к интенсификации гидрологического цикла [11]. Важно, что изменения осадков характеризуются пространственной неоднородностью. Например, вследствие отклика атмосферной циркуляции на потепление осадки растут в средних и высоких широтах Северного полушария и уменьшаются в субтропических регионах. Интенсификация гидрологического цикла, рост влагосодержания атмосферы и снижение статической устойчивости приводят к росту экстремальности осадков во многих регионах с одновременным учащением экстремальных явлений конвективного характера — сильных ливней, шквалов, торнадо [12]. Такие особенности изменений характеристик осадков при глобальном потеплении в целом были выявлены более 20 лет назад на основе анализа данных численных экспериментов с моделями климата [13]. При этом, как показывают недавние исследования, зависимость интенсивности экстремальных осадков от температуры может быть существенно нелинейной [14].

Изменения климата на территории России имеют ряд важных особенностей. Повышение температуры здесь происходит в 2.5 раза быстрее, чем в среднем по планете [1], что связано с эффектом арктического усиления глобального потепления [15]; он вызван наличием положительных обратных связей в климатической системе, усиливающих отклик климата на внешние воздействия в высоких широтах [16]. Огромная протяжённость территории России обуславливает существенные различия тенденций изменений климата в разных регионах, в частности, наблюдаемые разнонаправленные изменения осадков в тёплый период года, когда в северных регионах отмечается тенденция к росту, а в южных — к уменьшению [17].

Высокая изменчивость атмосферной циркуляции в средних и высоких широтах Северного полушария, а также преобладающая континентальность климата России обуславливают большую амплитуду межгодовых вариаций температуры на фоне долгопериодной тенденции к потеплению и, как следствие, низкую предсказуемость погодно-климатических аномалий. Две трети территории страны расположено в зоне “вечной мерзлоты” и в грани-

цах сезонного снежного покрова. Трансформация ландшафтов, заболачивание, быстрое разрушение берегов Российской Арктики при потеплении также относятся к важным особенностям трансформации природной среды нашей страны [18–20].

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Что является причиной глобальных изменений климата? Решение этой задачи было главным предметом науки об изменении климата во второй половине XX века. Научно обоснованный ответ на этот вопрос специалистам удалось найти в 1970-х годах, когда стал очевиден рост концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего углекислого газа вследствие сжигания человеком ископаемого топлива. Потепление вызывает так называемый парниковый эффект — способность некоторых газов поглощать инфракрасное излучение земной поверхности и переизлучать его во всех направлениях, в том числе обратно к поверхности, таким образом увеличивая приток энергии к Земле и разогревая её [21]. В это время группой учёных во главе с Сёкиро Манабе с помощью численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы были получены первые оценки изменения приземной температуры воздуха при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере¹ [22] (позднее они подтвердились как данными наблюдений, так и результатами более совершенных моделей климата [23, 24]). В те же 1970-е годы выдающийся советский климатолог академик М.И. Будыко получил схожие по величине оценки [25]. Следует отметить, что в 1950–1970-х годах был период, когда вследствие суперпозиции внутренних вариаций климата и потепления, вызванного ростом концентрации парниковых газов, глобальная температура не росла, а в высоких широтах Северного полушария падала. Несмотря на это М.И. Будыко утверждал, что потепление неизбежно продолжится, и оказался прав.

На чём основана уверенность в преобладающем антропогенном характере глобального потепления на масштабе 100 лет? Количество рецензируемых научных работ по тематике изменений климата и смежных дисциплин достигает в настоящее время нескольких десятков тысяч в год. Ввиду важности проблемы, её глобального характера, значительных происходящих и ожидаемых негативных последствий Всемирная метеорологическая организация и ООН в 1988 г. создали Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) для обобщения состояния знаний в этой области на основе экспертной оценки исследований по климатической тематике [26]. В группу экспертов входят представители более 100 стран, в том числе и специ-

¹ За эти работы С. Манабе (совместно с немецким физиком и метеорологом К. Хассельманом) был удостоен Нобелевской премии по физике 2021 г.

алисты по климату из России, сотрудники учреждений Росгидромета и РАН. Каждые 5–8 лет МГЭИК публикует доклады, содержащие аналитический обзор рецензируемой научной литературы с итоговыми выводами и резюме для политиков. Аналогичные оценочные доклады об изменении климата начиная с 2008 г. публикует и Росгидромет. В конце 2022 г. обнародован Третий оценочный доклад Росгидромета. Выводы профильных специалистов в области изменений климата однозначны: “Не вызывает сомнений, что разогрев атмосферы, океана и суши произошёл под влиянием человека” [27]. Ситуация, когда человек оказался в состоянии влиять на глобальный климат, беспрецедентна в истории Земли и может означать начало новой эпохи — антропоцена [28].

В качестве аргументов в пользу научных результатов, указывающих на важную роль антропогенного воздействия в глобальном потеплении последних 100 лет, можно указать на следующие факты.

1. Рост почти на 50%, с 280 до 420 частей на миллион (ч.н.м.), содержания углекислого газа в атмосфере вызван именно антропогенными эмиссиями, о чём свидетельствует изменение изотопного состава углерода в атмосфере [29]; углерод в ископаемом топливе содержит очень малое количество тяжёлых изотопов по сравнению с атмосферным “природным” углеродом.

2. Данные о составе атмосферы, полученные на основе анализа замороженных пузырьков воздуха в кернах антарктического ледника на станции “Восток” и в рамках проекта EPICA [30, 31], позволили получить данные о концентрации парниковых газов за последние 800 000 лет. На протяжении восьми ледниковых циклов рост концентрации CO_2 ограничивался диапазоном 170–300 ч.н.м и лишь в последние 100 лет его содержание возросло, как упомянуто выше, с 280 до 420 ч.н.м., что резко отличается от предшествующих вариаций. Современный рост беспрецедентен по своим темпам. Такие изменения за столь короткий срок могут быть объяснены только антропогенным воздействием.

3. Наблюдаемая вертикальная структура отклика температуры атмосферы (рост температуры в тропосфере и её падение в стратосфере и мезосфере) [32] соответствует радиационному воздействию вследствие роста содержания парниковых газов. Другие внешние воздействия, например солнечная или вулканическая активность, потоки тепла из океана или от суши, не приводят к таким контрастным тенденциям вертикального отклика температуры [33].

4. Спутниковые данные (начиная с 2000 г.), позволившие инструментально оценить величину дисбаланса энергии на верхней границе атмосферы вследствие роста концентрации углекислого газа [34], совпали с теоретическими результатами численных моделей, на которых основаны оценки

антропогенного вклада в современные изменения климата и сценарии его изменений в будущем.

5. Модели Земной системы, успешно воссоздающие основные характеристики климата, циркуляцию атмосферы, океана и морских льдов, гидрологический цикл, воспроизводят изменения глобальной температуры в последние 150 лет только при учёте антропогенного воздействия на климат. Без такого воздействия, с учетом влияния только факторов вулканической и солнечной активности, наблюдаемого роста температуры в моделях не происходит [35].

ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Для понимания причин изменений климата важно учитывать разнообразие временных масштабов климатических изменений, вызванных различными факторами внешнего воздействия и внутренней изменчивости климата. Динамика атмосферы и океана, деятельного слоя суши приводит к квазипериодическим изменениям климата на масштабах от сотен лет до межгодовых вариаций. Глубинная циркуляция океана, динамика ледников, в том числе под воздействием внешних факторов, могут формировать циклы длительностью в тысячи и десятки тысяч лет [36]. Геологические факторы, такие как движение континентов, субдукция и спрединг земной коры, дифференциация мантийного вещества, выветривание пород суши и связанные с этими процессами изменения состава атмосферы и уровня океана, обуславливают трансформации климата на масштабах от нескольких миллионов до миллиардов лет [37]. В ледниковых циклах диапазон изменений глобальной температуры составлял около 10°C , а за последние 500 млн лет размах температурных колебаний составлял $15\text{--}20^\circ\text{C}$. Важно, что эти изменения происходили на масштабах от нескольких тысяч лет до нескольких миллионов лет, тогда как современные изменения произошли за 100 лет — мгновение в геологической истории Земли и очень короткий временной промежуток на масштабах ледниковых циклов.

Некоторые циклы внутренней изменчивости океана и атмосферы проявляются на масштабах от нескольких лет до нескольких десятилетий и могут приводить к заметным изменениям глобальной температуры (на $0.2\text{--}0.5^\circ\text{C}$) [38]. Крупные вулканические извержения в исторический период приводили к отрицательной аномалии температуры поверхности до 0.5°C длительностью 1–2 года. Факторы внутренней изменчивости и естественного внешнего воздействия на климат в период инструментальных наблюдений (последние 150 лет) способны формировать значимые аномалии климата на масштабах от года до нескольких десятков лет. С ростом рассматриваемого периода изменений от 60 лет и больше вклад этих циклов и корот-

ких аномалий в долгопериодный климатический тренд становится малым и определяющую роль начинает играть антропогенное воздействие на климат [39].

ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В Общем резюме Третьего оценочного доклада Росгидромета указывается: “Проявления изменений климата на территории Российской Федерации характеризуются впечатляющим многообразием и неоднозначностью последствий для природной среды, экономики и населения нашей страны. Для России важен весь комплекс угроз, рисков и возможностей, обусловленных наблюдаемыми и ожидаемыми климатическими изменениями, что вносит специфические особенности в политику Российской Федерации в области климата как на федеральном, так и на региональном уровнях и что в определённой мере отличает нашу страну от большинства стран мира”. Для России изменения климата имеют как негативные, так и позитивные последствия [40].

К числу значимых негативных последствий относятся ущерб от опасных погодно-климатических явлений, участвовавших при глобальном потеплении, — природных пожаров, почвенных засух, маловодности рек в южных регионах России, деградации вечной мерзлоты, связанной с рисками для построенной на многолетнемёрзлых грунтах инфраструктуры [41, 42], выхода климатических характеристик за принятые в строительных нормах диапазоны. Растут риски для тепловой энергетики в летний период из-за увеличения энергопотребления и снижения мощности производства вследствие повышения температуры водяных охладителей. Повышение глобальной температуры усиливает риски негативного влияния этого фактора на здоровье населения, в том числе из-за волн жары и загрязнения атмосферы [43–45]. Следует также иметь в виду, что современная техника и инфраструктура становятся более сложными, требуют тонкой настройки и более чувствительны к климатическим параметрам.

К положительным последствиям можно отнести сокращение площади арктических морских льдов, что облегчит добычу полезных ископаемых на арктическом шельфе и приведёт к увеличению продолжительности безлёдной навигации по Северному морскому пути [46, 47]. Возрастёт объём стока северных рек как источника пресной воды и гидроэнергии, ослабнет холодовой стресс, уменьшится температурный контраст зима–лето, сократится отопительный сезон [1].

При этом важно учитывать, что продолжающееся потепление в будущем может изменить характер ожидаемых последствий. Например, дальнейшее сокращение морских льдов в Арктике и устойчивый

безлёдный режим за пределами российской экономической зоны откроют возможность прохода судов иностранных государств через Северный Ледовитый океан, что может представлять потенциальную угрозу военной, экономической и экологической безопасности России.

Очевидно, что для снижения рисков негативных последствий изменений климата и использования выгод от положительных последствий необходимо своевременно принимать меры адаптации [48, 49], для чего требуется разработка прогнозов возможных будущих изменений климата с оценкой диапазона их неопределённости. Учёт возможных изменений климатических факторов критически важен при планировании устойчивого развития российских регионов на горизонте 10–20 лет и более.

Источником информации о возможных изменениях климата в будущем служат численные модели Земной системы, которых в настоящее время в мире насчитывается около 50. В них используются сценарии изменений антропогенных эмиссий парниковых газов и аэрозолей в атмосферу, которые зависят от темпов роста и характера мировой экономики, увеличения населения Земли, предпринимаемых усилий по снижению антропогенных выбросов. Результаты множества моделей обобщаются и верифицируются в рамках специальных проектов по сравнению моделей и с использованием статистических методов, позволяющих сузить диапазон неопределённости получаемых прогнозов [50]. В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН активно развивается национальная модель Земной системы, участвующая в международных проектах сравнения моделей климата [51]. В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН разрабатывается модель Земной системы промежуточной сложности — с её помощью можно проводить численные эксперименты, позволяющие моделировать климатические процессы на временных интервалах в тысячи лет, в том числе с учётом интерактивных биогеохимических процессов [52].

Наиболее реалистичные сценарии антропогенного воздействия приводят к выводу, что к концу XXI в. глобальная температура повысится на 3–5°C, количество осадков над сушей возрастёт на 4–8% относительно современных значений. Важно, что рост глобальной температуры и количества осадков в ближайшие два десятилетия мало зависит от выбранного сценария антропогенной эмиссии и составляет, соответственно, около 0.6°C и 1.5%, что примерно соответствует изменениям в последние 20 лет [1]. Таким образом, современные глобальные тенденции можно линейно экстраполировать на ближайшее будущее.

Важно, что региональные климатические изменения могут существенно отличаться от глобальных, в том числе и качественно, вследствие влияния факторов внутренней изменчивости климата (например, вследствие квазициклических изменений

океанической циркуляции с периодами 30–60 лет). Учёт этих факторов может существенно повысить достоверность сценарных прогнозов. В последние 15 лет активно развивается такое направление, как десятилетний прогноз, учитывающий внутреннюю динамику климата и её начальные условия, что позволяет точнее прогнозировать изменения климата во многих регионах [53].

НАУКА О КЛИМАТЕ И ЕЁ ЗАДАЧИ

Наука о климате представляет собой один из разделов наук о Земле. Являясь главным образом частью геофизики, она обладает рядом важных особенностей. Первейшая из них — мультидисциплинарность [54], связанная со сложностью объекта исследования (в формировании климата активно участвует Земная климатическая система, состоящая из атмосферы, океана, криосферы, литосферы и биосферы), а также существенным влиянием изменений климата на окружающую среду, жизнедеятельность человека, экономику, инфраструктуру, а в последнее время на геополитику и даже мораль современного общества [55].

Для профессионального понимания динамики климата учёный должен обладать профильным образованием, представлением об основных механизмах изменчивости климата, о динамике климатической системы на разных масштабах, опытом решения научных задач в этой области. Показатель уровня компетенции исследователя — защищённые диссертации, публикации в рецензируемых научных журналах соответствующего профиля и, конечно, опыт работы в этой сфере, тесно связанный с количеством и качеством публикаций. Считаю важным подчеркнуть, что проблемы изменений климата должны обсуждаться компетентными специалистами.

Политизированность обсуждения этих проблем и широкий общественный интерес к ним привлекают внимание учёных из других областей науки, не имеющих специализированных знаний и опыта исследований в науке о климате. Часто, ввиду значительности заслуг и достижений в своей области знаний, мнение неспециалистов в вопросах изменений климата выдаётся за альтернативное общепринятому в научном сообществе климатологов.

Выводы специалистов о ведущей роли антропогенных воздействий в глобальных трансформациях климата последних десятилетий, основанные на всесторонней диагностике и моделировании природных процессов, никак не связаны с их позицией по вопросам “зелёной энергетики”, углеродного регулирования, по другим экономическим и политическим инициативам. Эти выводы — результат естественно-научных исследований и публикаций в рецензируемых научных журналах.

Все ведущие отечественные учёные-климатологи отмечают, что изменения климата несут для Рос-

сии как негативные, так и позитивные последствия, а также указывают на необходимость взвешенного подхода к этим изменениям с учётом траектории экономического развития страны, где на первом месте должны быть устойчивое развитие и рост благосостояния граждан. Регулирование российской экономики, в том числе в рамках международных соглашений в области климата, равно как и принятие таких соглашений, должны осуществляться на основе принципа абсолютного приоритета национальных интересов в условиях глобализации и серьёзных геополитических вызовов. А решение задач науки о климате, в том числе выявления механизмов современных и прогноза будущих изменений климата, — фундаментальная проблема физики атмосферы и океана, которая должна решаться специалистами на основе накопленных знаний и новых экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых доказали свою достоверность.

Нередко встречающаяся при общественном обсуждении климатической повестки искусственная дихотомия “сторонники антропогенного потепления как проводники западной политики” и “сторонники естественных факторов изменения климата как защитники национальных интересов”, с одной стороны, препятствует конструктивному обсуждению научных вопросов, переводя дискуссию в политическую плоскость, а с другой — создаёт прямую угрозу национальной безопасности страны при обсуждении, обосновании и принятии стратегических решений в области политики и экономики, дискредитируя с использованием политических ярлыков консолидированную позицию специалистов и противопоставляя ей аргументы, не прошедшие научной экспертизы.

В настоящее время главными задачами, стоящими перед наукой о климате и имеющими важное практическое значение, являются:

- разработка сценарных прогнозов изменений климата в будущем с высокой детальностью и оценкой их неопределённости на горизонте 20–50 лет;
- региональные прогнозы состояния климата с учётом его внутренней изменчивости (десятилетний прогноз) на масштабах 10–20 лет;
- мониторинг состояния климата, в том числе выявление тенденций изменений и оценка статистических распределений климатических характеристик;
- оценка рисков опасных погодноклиматических явлений, сезонный и межгодовой прогноз погодноклиматических аномалий;
- оценка последствий изменений климата для окружающей среды и человека.

Для решения указанных задач необходимы фундаментальные исследования механизмов изменчивости климата на разных пространственных и временных масштабах, выявление относительной роли антропогенных факторов, внутренней

естественной изменчивости и внешнего естественного воздействия. Необходимо создание новых и совершенствование существующих глобальных численных моделей Земной системы и региональных моделей климата. Требуется развитие методов прогноза погоды и климата на разных временных масштабах, методов диагностики и статистического анализа данных наблюдений и результатов численного моделирования. Критически важно получать инструментальные данные о состоянии Земной системы, в том числе океанографические и спутникового мониторинга, развивать сеть станционных наблюдений, совершенствовать методы получения и обработки массива информации, полученной инструментальными методами.

На наш взгляд, следует расширить взаимодействие и объединить усилия Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук, часто работающих над общими проблемами, в том числе прогноза погоды и климата. Этому может способствовать создание межведомственного климатического центра Росгидромета и РАН с определением основных направлений и координацией работ по ним.

Критически важно качественно расширить суперкомпьютерные ресурсы, доступные для климатических исследований. Во всех ведущих странах существуют суперкомпьютерные центры, специализирующиеся на моделировании и прогнозе климата. Создание такого центра под руководством РАН позволило бы существенно активизировать научные исследования и получать более детальные и достоверные результаты в области диагностики и прогнозирования изменений климата.

Важно поддерживать и развивать ведущие научные школы в области физики атмосферы, океана, климата, усиливать взаимодействие институтов РАН с профильными кафедрами вузов, обеспечить приток новых квалифицированных молодых учёных и обеспечить их поддержку.

Крайне необходимо увеличить финансирование экспедиционных исследований, в том числе морских экспедиций, развивать существующие и создавать новые научные стационары, занимающиеся наблюдениями за климатическими процессами.

Успешным опытом организации мультидисциплинарных исследований в области климата была Программа фундаментальных исследований президиума РАН “Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”. Возобновление этой программы с определением новых задач и участников под эгидой Научного совета РАН по проблемам климата Земли будет способствовать координации исследований, усилит взаимодействие научных коллективов, позволит сформулировать и решить актуальные задачи в области изменений климата и адаптации к ним.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность академикам РАН В.Г. Бондуру, И.И. Мохову, Б.Н. Порфирьеву, члену-корреспонденту РАН А.А. Макоско, докторам физико-математических наук, профессорам РАН А.С. Грищину, А.В. Елисееву, кандидату физико-математических наук А.В. Чернокульскому и кандидату географических наук М.А. Алешиной за полезные обсуждения и помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022.
The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / Ed. by V.M. Kattsov. St.Petersburg.: Science-intensive technologies, 2022. (In Russ.)
2. Dommenget D. The Ocean's Role in Continental Climate Variability and Change // J. Climate. 2009. V. 22. P. 4939–4952.
3. PAGES 2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era // Nat. Geosci. 2019. V. 12. P. 643–649.
4. Neukom R., Steiger N., Gómez-Navarro J.J. et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // Nature. 2019. V. 571. P. 550–554.
5. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1434.
6. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–33.
Semenov V.A. Modern Arctic climate research: Progress, change of concepts, and urgent problems // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. P. 18–28.
7. Zemp M., Huss M., Thibert E. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. 2019. V. 568. P. 382–386.
8. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K. et al. The changing thermal state of permafrost // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. V. 3. P. 10–23.
9. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. P. 84–92.

10. *Елисеев А.В., Васильева А.В.* Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 3. С. 73–119.
Eliseev A.V., Vasileva A.V. Natural fires: observational data and modelling // *Fundamental and Applied Climatology*. 2020. V. 3. P. 73–119. (In Russ.)
11. *Allan R.P., Barlow M., Byrne M.P. et al.* Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2020. V. 1472. P. 49–75.
12. *Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др.* Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 27–41.
Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A. et al. Atmospheric severe convective events in Russia: Changes observed from different data // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. V. 47. № 5. P. 343–354.
13. *Semenov V., Bengtsson L.* Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V. 19. P. 123–140.
14. *Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // *Env. Res. Lett.* 2021. V. 16. P. L105004.
15. *Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // *Journal of Climate*. 2010. V. 23(14). P. 3888–3906.
16. *Семенов В.А.* Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–33.
Semenov V.A. Modern Arctic climate research: Progress, change of concepts, and urgent problems // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. P. 18–28.
17. *Золina О.Г., Булыгина О.Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. № 1. С. 84–103.
Zolina O.G., Bulygina O.N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia // *Fundamental and Applied Climatology*. 2016. V. 1. P. 84–103. (In Russ.)
18. *Anisimov O., Reneva S.* Permafrost and Changing Climate: The Russian Perspective // *Ambio*. 2006. V. 35. P. 169–175.
19. *Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A et al.* Coastal erosion of the Russian Arctic: an overview // *J. Coast. Res.* 2020. V. 95. P. 599–604.
20. *Kirpotin S.N., Callaghan T.V., Peregon A.M. et al.* Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia // *Ambio*. 2021. V. 50. P. 26–52.
21. *Семёнов С.М.* Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 2. С. 103–126.
Semenov S.M. Greenhouse effect: discovery, concept development, role in formation of global climate and its human induced changes // *Fundamental and Applied Climatology*. 2015. V. 2. P. 103–126. (In Russ.)
22. *Manabe S., Wetherald R.T.* Effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1975. V. 32(1). P. 3–15.
23. *Feldman D.R. et al.* Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010 // *Nature*. 2015. V. 519(7543). P. 339–343.
24. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.).* IPCC. Geneva, Switzerland. P. 1–34.
25. *Будыко М.И.* Влияние человека на климат. Л.: Гидрометеиздат. 1972.
Budyko M.I. Human influence on the climate. L.: Gidrometeoizdat, 1972. (In Russ.)
26. IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/>
27. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научоёмкие технологии, 2022.
The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary / Ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg: High-tech technologies, 2022. (In Russ.)
28. The history of climate. L.: Hydrometeoizdat, 1979. *Steffen W., Grinevald J., Crutzen P., McNeill J.* The Anthropocene: Conceptual and historical perspectives // *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*. 2011. V. 369. P. 842–867.
29. *Keeling C.D.* The Suess effect: 13Carbon-14Carbon interrelations // *Environ. Int.* 1979. V. 2. P. 229–300.
30. *Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
31. *Luthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al.* High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present // *Nature*. 2008. V. 453(7193). P. 379–382.
32. *Мохов И.И., Семенов А.И.* Нелинейные температурные изменения в атмосфере в области мезопаузы на фоне глобальных изменений климата

- в 1960–2012 гг. // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 5. С. 596–599.
- Mokhov I.I., Semenov A.I.* Nonlinear temperature changes in the atmospheric mesopause region of the atmosphere against the background of global climate changes, 1960–2012 // Doklady Earth Sciences. Springer Nature BV. 2014. V. 456. №. 2. P. 741.
33. *Santer B.D., Po-Chedley S. Zhao L. et al.* Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature // Proc. Natl. Acad. Sci. 2023. V. 120. P. e2300758120.
34. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Balmaseda M.A.* Earth's Energy Imbalance // J. Climate. 2014. V. 27. P. 3129–3144.
35. *Hegerl G., Zwiers F.* Use of models in detection and attribution of climate change // Wiley Interdiscip. Rev.: Clim. Change. 2011. V. 2. P. 570–591.
36. *Franzke C.L.E., Barbosa S., Blender R. et al.* The structure of climate variability across scales // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. P. e2019RG000657.
37. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
- Monin A.S., Shishkov YU.A.* The history of climate. L.: Hydrometeoizdat, 1979. (In Russ.)
38. *Semenov V.A., Latif M., Dommenget D. et al.* The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. 2010. V. 23. P. 5668–5677.
39. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Доклады РАН. 2022. Т. 503. С. 48–54.
- Mokhov I.I., Smirnov D.A.* Empirical estimates of the contribution of greenhouse gases and natural climatic variability to surface air temperature trends for various latitudes // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing, 2022. V. 503. №. 1. P. 114–118.
40. *Мохов И.И.* Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. № 1. С. 3–14.
- Mokhov I.I.* Climate Change: Causes, Risks, Consequences, and Problems of Adaptation and Regulation // Herald of the RAS. 2022. № 1. P. 1–11.
41. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник РАН. 2019. № 12. С. 1228–1239.
- Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletskiy D.A.* Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Road Infrastructure Sustainability under Climate Change in the Russian Arctic // Herald of the RAS. 2019. № 6. P. 567–576.
42. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации многолетней мерзлоты для объектов системы здравоохранения российской Арктики // Вестник РАН. 2021. № 12. С. 1125–1136.
- Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletskiy D.A.* Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Healthcare Facilities in the Russian Arctic // Herald of the RAS. 2021. № 6. P. 677–686.
43. *Ревич Б.А., Малеев В.В.* Изменения климата и здоровье населения России: Анализ ситуации и прогнозные оценки. М.: ЛЕНАНД, 2011.
- Revich B.A., Maleev V.V.* Climate change and the health of the Russian population: Situation analysis and forecast estimates. M.: LENAND, 2011. (In Russ.)
44. *Макоско А.А., Матешева А.В.* Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук, 2020.
- Makosko A.A., Matesheva A.V.* Atmospheric pollution and the quality of life of the population in the XXI century: threats and prospects. M.: Russian Academy of Sciences, 2020. (In Russ.)
45. *Grigorieva E.A., Revich B.A.* Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 1331.
46. *Парфёнова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Изменения периода навигации на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчётам с ансамблем климатических моделей // Доклады РАН. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.
- Parfenova M.R., Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Changes in the duration of the navigation period in Arctic seas along the Northern Sea Route in the twenty-first century: Bayesian estimates based on calculations with the ensemble of climate models // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing, 2022. V. 507. №. 1. P. 952–958.
47. *Семенов В.А., Черенкова Е.А., Алдонова Т.А.* Современные и ожидаемые характеристики сезонного хода ледового покрова в морях Российской Арктики // Доклады РАН. 2023. Т. 511. № 1. С. 112–118.
- Semenov V.A., Cherenkova E.A., Aldonina T.A.* Modern and Projected Characteristics of the Seasonal Cycle of Ice Cover in the Russian Arctic Seas // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing, 2023. V. 511. №. 1. P. 608–613.
48. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Выпуск 586 / Под ред. В.М. Катцова, В.П. Мелешко. СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2017. С. 7–20.
- Kattsov V.M., Porfir'ev B.N.* Adaptation of Russia to climate change: the concept of the national plan // Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov. Issue 586 / Ed. by

- V.M. Kattsov, V.P. Meleshko. St. Petersburg: Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov, 2017. P. 7–20.
49. Макаров И.А., Чернокульский А.В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. 2023. № 4(61). С. 145–202.
Makarov I.A., Chernokul'skij A.V. The impact of climate change on the Russian economy: a rating of regions on the need for adaptation // Journal of the New Economic Association. 2023. №. 4(61). P. 145–202. (In Russ.)
 50. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
 51. Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.
Volodin E. M., Gritsun A. S. Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. №. 3. P. 218–228.
 52. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады РАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
Mokhov I.I., Eliseev A.V., Guryanov V.V. Model estimates of global and regional climate changes in the Holocene // Doklady Earth Sciences. Pleiades Publishing. 2020. V. 490. P. 23–27.
 53. Keenlyside N., Latif M., Jungclaus J. et al. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector // Nature. 2008. V. 453(7191). P. 84–88.
 54. Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Проблема климатических изменений — поле сближения и взаимодействия естественных и социогуманитарных наук // Вестник РАН. 2020. № 10. С. 914–925.
Danilov-Danil'yan V.I., Kattsov V.M., Porfiriev B.N. The Problem of Climate Change: The Field of Convergence and Interaction between Natural Sciences and the Sociohumanities // Herald of the RAS. 2020. № 5. P. 577–587.
 55. Семенов В.А. Изменения климата как новая мораль в экономических отношениях // Труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 2016. № 2. С. 215–226.
Semenov V.A. Climate change as a new morality in economic relations // Proceedings of the Free Economic Society of Russia. 2019. V. 2016. №. 2. P. 215–226. (In Russ.)

CLIMATE CHANGE: CAUSES, CONSEQUENCES, IMPERATIVES

V.A. Semenov^{a,b,*}

^aA.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

*E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

Climate change is one of the most important interdisciplinary problems of the XXI century, encompassing environmental, economic and social aspects of sustainable development of the Russian Federation. The article considers the main aspects of the global climate change, its peculiarities and consequences on the territory of the Russian Federation. The author formulates actual tasks of climate science for the coming years and decades and suggests important steps necessary for solving these tasks. The article is based on the materials of the report presented by the author at the General Meeting of the Russian Academy of Sciences on December 12th, 2023.

Keywords: climate change, causes of climate change, consequences of climate change, current challenges of climate science.