

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, РИСКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

© 2022 г. И. И. Мохов^{a,b}

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

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 02.08.2021 г.

После доработки 12.08.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Обращаясь к популярной ныне теме глобальных изменений климата — его потепления, особенно в высоких широтах, автор — сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли — подробно анализирует тенденции наблюдаемых температурных вариаций, их глобальные и региональные особенности. В статье отмечается, что повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. Утверждается, что климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определённого критического уровня климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учётом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена, считает автор.

Статья основана на материалах доклада, представленного автором на заседании президиума РАН 13 октября 2020 г.

Ключевые слова: глобальные и региональные изменения климата, естественные и антропогенные факторы, экстремальные явления и процессы, климатические модели, проблемы адаптации и регулирования.

DOI: 10.31857/S0869587322010066

Последние десятилетия характеризуются значительными глобальными и региональными климатическими изменениями, особенно в высоких широтах [1–4]. Климатические изменения — одна из ключевых проблем нашего времени. Повыше-



МОХОВ Игорь Иванович — академик РАН, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН, заведующий кафедрой физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

ние глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. На рисунке 1 показаны тренды среднегодовой температуры у поверхности для разных широт в 1980–2019 гг. с максимальным потеплением до 4°C и более в арктических широтах (по данным GISS, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Наибольшая скорость температурных изменений в арктических широтах (так называемое Арктическое усиление) формируется под влиянием ряда климатических обратных связей, в том числе из-за зависимости альбедо поверхности от температуры.

Рисунок 2 характеризует межгодовые изменения приповерхностной температуры (аномалии относительно базового периода 1951–1980 гг.) в

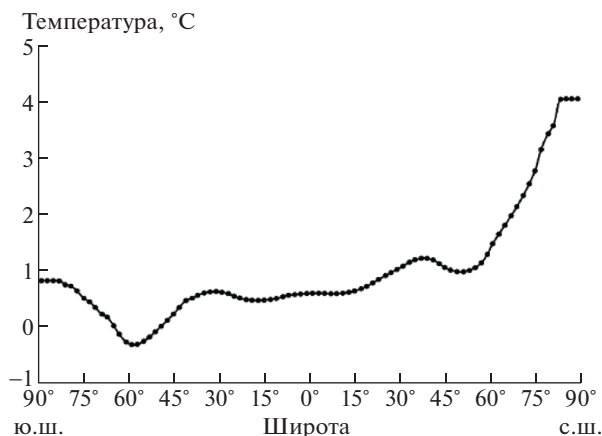


Рис. 1. Изменения среднегодовой приповерхностной температуры на разных широтах Северного и Южного полушарий, 1980–2019 гг.

Арктике в сопоставлении с соответствующими вариациями в средних и тропических широтах Северного полушария и для Земли в целом на основе данных наблюдений (<http://www.metoffice.gov.uk/>) [5]. Во внутривековых температурных региональных (в частности, в атлантическом секторе Арктики), полушарных и глобальных вариациях, а также в изменениях ледовитости арктических морей значимо проявляются вариации с временным масштабом в несколько десятилетий, типичным для Атлантической мультideсятилетней осцилляции (АМО). Согласно модельным расчётам, АМО связана с соответствующими вариациями глобальной термохалинной циркуляции океана, одна из ветвей которой – Гольфстрим. Влияние этого глобального океанического конвейера определяет существенный утепляющий эффект в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики.

По данным, регистрируемым с XIX в., глобальная приповерхностная температура в по-

следние годы и десятилетия была самой высокой. Наблюдения свидетельствуют (<https://cruda.ta.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), что в последнее десятилетие (2011–2020 гг.) она была на 0.2 К выше относительно 2001–2010 гг., на 0.4 К – относительно 1991–2000 гг., на 0.6 К – относительно 1981–1990 гг. и на 0.8 К – относительно 1971–1980 гг. Скорость глобального потепления впечатляет, особенно в сопоставлении с целями Парижского соглашения 2015 г. об изменении климата, в котором ставится цель не допустить глобальное потепление более чем на 1.5 К, в крайнем случае на 2 К, относительно доиндустриального периода.

Наиболее заметно новые тенденции проявляются в повторяемости и интенсивности экстремальных региональных явлений и процессов [1, 2]. На фоне общего потепления отмечается усиление климатической изменчивости – “нервности” климата. По данным Росгидромета (<http://www.meteorf.ru/>), число опасных метеорологических явлений за последние два десятилетия увеличилось примерно втрое на фоне быстрого потепления в России – со скоростью примерно 0.5 К за десятилетие (в два с половиной раза быстрее глобального), а в ряде регионов – около 1 К за десятилетие (рис. 3). Существенно, что наибольшее количество гидрометеорологических аномалий отмечается в российских регионах в тёплые месяцы – чаще летом. Число опасных явлений в России с 1998 по 2019 г. увеличивалось в среднем на 21 событие в год, а летом (40% общего количества за год) – в среднем на 10 событий в год. В частности, для летних сезонов последних лет отмечена статистически значимая связь (на уровне 90%) количества опасных метеорологических явлений с температурными аномалиями в российских регионах – с его ростом на 45% при увеличении приповерхностной температуры на 1 К для России в целом. Следует отметить, что в последние годы в московском регионе впервые – во время шквалов в 2017 г. и 2018 г. – зарегистрирована

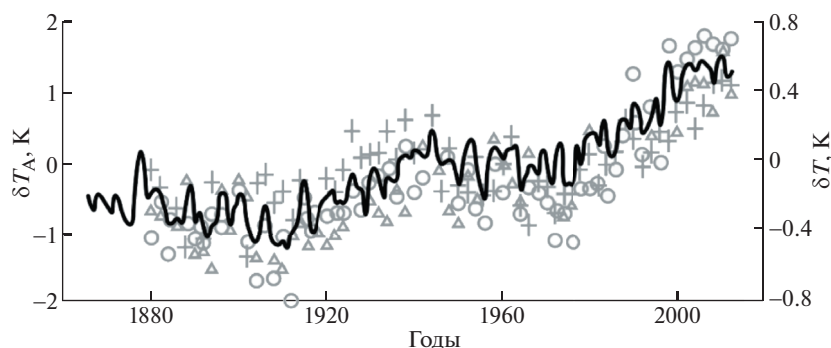


Рис. 2. Межгодовые вариации аномалий приповерхностной температуры в Арктике δT_A (крестики), в средних (кружки) и тропических (треугольники) широтах Северного полушария (левая шкала), а также для Земли в целом δT (жирная кривая, правая шкала)

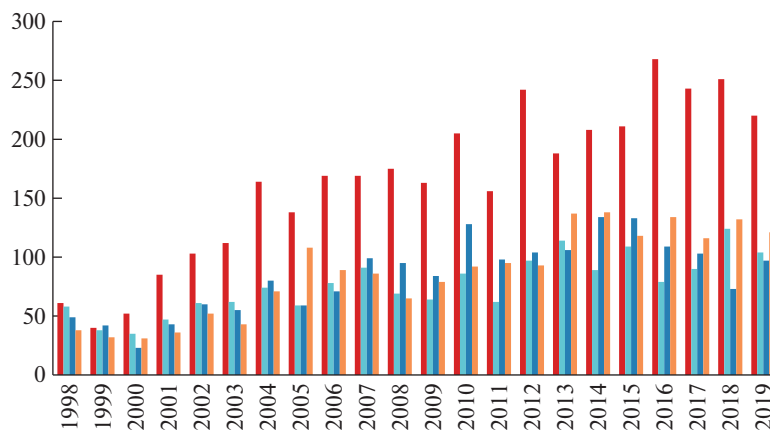


Рис. 3. Межгодовые изменения количества опасных метеорологических явлений в России: 1 – летом, 2 – осенью, 3 – зимой, 4 – весной

ураганная скорость ветра (более 33 м/с) в пределах приземного слоя атмосферы.

Как соотносятся современные изменения климата с изменениями прошлых эпох? По данным палеореконокструкций, в течение последних десятков миллионов лет температура у поверхности Земли падала до некоторого критического режима – наступления так называемого плейстоцена около 2 млн лет назад. Для плейстоцена характерны ледниковые циклы, связанные с изменениями параметров орбиты Земли вокруг Солнца (эксцентриситета, угла наклона земной оси к плоскости эклиптики и прецессии) с периодами около 100, 40 и 20 тыс. лет – циклами Миланковича. Проявлению этих циклов в четвертичном периоде способствовала положительная обратная связь альbedo поверхности Земли – температура, в формировании которой значимую роль играет снежно-ледовый покров. Анализ содержания пузырьков воздуха в ледовых ядрах российской антарктической станции Восток, а впоследствии по данным международного проекта EPICA, выявил соответствующие температурным циклам вариации атмосферных компонентов, включая парниковые газы, углекислый газ и метан. Отмеченное при этом некоторое общее запаздывание вариаций их содержания относительно температурных изменений нередко используется в качестве аргумента против признания антропогенных причин современных изменений климата. На самом деле противоречий тут нет. Изменения связаны с разными механизмами радиационного воздействия на климат и на углеродный цикл Земли, которые значительно различаются по своим временным масштабам. Существенно, что только по запаздыванию нельзя судить о причинно-следственных связях в земной климатической системе. Знак временного сдвига зависит от ряда факторов, характеризующих систему и тип её возмущений, включая временные масштабы [6]. В настоящее

время Земля находится в межледниковье на температурном пике ледникового цикла – в так называемом голоцене – уже более 11 тыс. лет. После достижения максимального температурного режима – оптимума голоцена около 6 тыс. лет назад, температура в целом понижалась (до наступления индустриальной эпохи).

В последнее столетие ситуация принципиально изменилась: по данным наблюдений, на фоне естественной изменчивости отмечается заметное глобальное потепление, которое связывается с антропогенными воздействиями, прежде всего с ростом содержания в атмосфере таких парниковых газов, как углекислый газ и метан. Модельные прогностические оценки свидетельствуют о формировании новой эпохи – антропоцена. При этом согласно модельным расчётам, уже для сотен тысяч лет в зависимости от уровня антропогенных эмиссий парниковых газов с учётом потенциала метангидратов (на суше и на шельфе) возможно существенное замедление (до десятков тысяч лет) наступления очередного ледникового периода и даже пропуск очередного цикла [7]. В последние годы содержание CO₂ в земной атмосфере превысило знаковый рубеж – 400 млн⁻¹ и продолжает увеличиваться, в 2020 г. на станции Мауна Лоа содержание CO₂ уже составило около 420 млн⁻¹. На российской арктической станции Териберка на Кольском полуострове (69° с.ш., 35° в.д.) к концу 2020 г. концентрация CO₂ в атмосфере достигла уровня 427 млн⁻¹, то есть доиндустриальный уровень (280 млн⁻¹) превышен в полтора раза. Сравнение с палеореконокструкциями свидетельствует о рекордном содержании CO₂ в течение последнего миллиона лет. В истории Земли содержание углекислого газа достигало и на порядок больших значений, но человечество никогда не жило при таких концентрациях CO₂ в атмосфере (пока не опасных для здоровья людей).

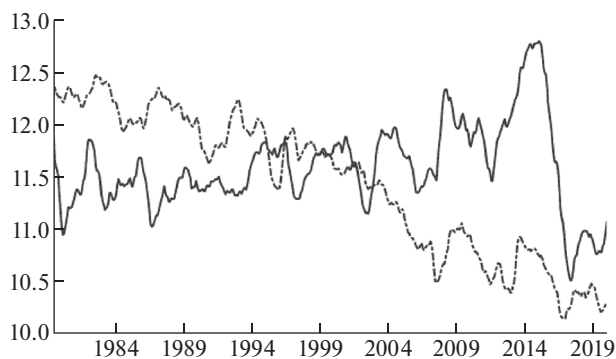


Рис. 4. Изменение площади арктических (пунктир) и антарктических (сплошная кривая) морских льдов (млн км²) по среднемесячным данным для периода 1978–2020 гг. при скользящем годовом осреднении

По данным метеонаблюдений, с XIX в. скорость общего роста приповерхностной температуры над сушей заметно больше, чем над океаном. Это связано с океанической инерционностью, проявляющейся в том числе в меньших межгодовых вариациях температуры. С середины XX в. отмечается значимый рост теплосодержания Мирового океана [8]. На фоне увеличения глобальной приповерхностной температуры проявляются её сильнее межгодовые вариации, связанные с явлениями Эль-Ниньо. В фазе Эль-Ниньо, как это было в начале 2020 г., при положительных аномалиях температуры Тихого океана в экваториальных широтах глобальная температура у поверхности обычно выше, а в противоположной фазе (Ла-Нинья) ниже, чем в нейтральные годы. Согласно прогностическим оценкам (см., например, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), ещё весной 2020 г. с высокой вероятностью ожидалось, что 2021 г. начнётся в фазе Ла-Нинья, соответственно можно было предполагать, что этот год будет в среднем по миру холоднее 2020 г. [9].

С середины XX в. (<https://data.giss.nasa.gov>) отмечается приповерхностное потепление во всех широтных зонах с максимальной скоростью в арктических широтах и минимальной для океанического пояса в субантарктических широтах. При этом на фоне долгопериодного потепления для более короткого 40-летнего интервала (1980–2019 гг.) в субантарктических широтах отмечалось понижение температуры у поверхности при быстром потеплении в Арктике (см. рис. 1). Выявленные температурные особенности свидетельствуют о значимости естественных вариаций климата с периодами порядка нескольких десятилетий, в частности для антарктических и субантарктических широт с морскими льдами. Отмеченные температурные особенности проясняют проблему разнонаправленных изменений по спутниковым данным, доступным только с 1979 г., с резким

уменьшением протяжённости морских льдов в Антарктике после 2016 г.

В связи с быстрым потеплением в Арктике в последние десятилетия отмечается резкое сокращение общей протяжённости морских льдов [10–12]. При этом одна из ключевых климатических проблем последних лет связана с различными тенденциями изменения ледовитости в Арктике и Антарктике (рис. 4). Общая протяжённость антарктических морских льдов по спутниковым данным с конца 1970-х годов росла, хотя и неравномерно и статистически незначимо. В результате к 2014 г. её среднегодовая площадь достигла рекордно высокого уровня – почти 13 млн км². Но с 2016 г. последовало резкое уменьшение этой площади с достижением рекордно низких значений, по сравнению с концом 1970-х годов. На фоне быстрого сокращения общей протяжённости морских льдов в Арктике в связи сильным арктическим потеплением изменения ледовитости в субантарктических и антарктических акваториях при относительно слабых соответствующих температурных вариациях связаны со значимым влиянием естественных мод климатической изменчивости. При этом в последние два десятилетия проявляется более значимая когерентность долгопериодных вариаций общей протяжённости и площади антарктических морских льдов с температурным режимом в Антарктике и для Южного полушария в целом. Отмеченное в последние годы резкое уменьшение общей протяжённости морских льдов в Антарктике – индикатор возможного начала ожидаемой на основе прогностических модельных оценок долгопериодной тенденции ослабления ледовитости в Южном полушарии при глобальном потеплении [4, 13].

Внутривековые климатические изменения в разных широтных зонах и для Земли в целом обнаруживают общие закономерности, при этом в арктических широтах изменения существенно сильнее (см. рис. 2). Во внутривековой температурной изменчивости значимо проявляются вариации с временным масштабом около шести десятилетий, характерные для АМО. В работе [12] проведён анализ условий влияния климатических мод с характерным временным масштабом до нескольких десятилетий на фоне вековой тенденции потепления на региональном и глобальном уровне. В простейшем случае гармонического колебания температуры $T(t)$ с периодом T_0 и амплитудой ΔT на фоне векового линейного тренда $(dT/dt)_c$ условие отсутствия временного интервала с похолоданием сводится к условию

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_c / \left(\frac{2\pi\Delta T}{T_0}\right) \geq 1.$$

С использованием данных о приповерхностной температуре начиная с XIX в. получены оцен-

Таблица 1. Оценки вклада парниковых газов в изменения (тренды) приповерхностной температуры для периодов разной продолжительности относительно современного режима (в прошлые десятилетия), по данным с конца XIX в.

Период, годы	Глобальное осреднение	Тропические широты	Средние широты	Высокие широты
20	0.6	0.6	0.4	0.3
30	0.6	0.7	0.4	0.4
50	0.8	0.9	0.7	0.6
130	0.9	1.0	1.0	1.0

Таблица 2. Относительный вклад естественных вариаций (АМО) и парниковых газов в изменения (тренды) приповерхностной температуры для периодов разной продолжительности относительно современного режима (в прошлые десятилетия), по данным с конца XIX в.

Период, годы	Глобальное осреднение	Тропические широты	Средние широты	Высокие широты
20	0.8	0.7	1.0	1.0
30	0.5	0.5	0.7	0.7
50	0.1	0.1	0.2	0.2
130	0.0	0.0	0.0	0.0

ки для Северного полушария в целом с амплитудой приповерхностных температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 около 60 лет (как для АМО) около 0.2 К (при минимальной оценке около 0.1 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для Северного полушария в целом для отсутствия временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда соответствующих температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 (около 60 лет) не превышала $(\Delta T)_{NH}(T_0/2\pi) = 0.1$ К. Аналогичные оценки получены для амплитуды осцилляций ΔT_A с периодом T_0 примерно 60 лет для Арктики в целом — около 0.3 К (при максимальной оценке около 0.4 К и минимальной около 0.2 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для Арктики в целом $(dT/dt)_A = 2.4$ К/100 лет для отсутствия соответствующего интервала временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда температурных осцилляций ΔT_A с периодом T_0 около 60 лет не превышала $(dT/dt)_A(T_0/2\pi) = 0.2$ К. Согласно полученным оценкам, возможно замедление скорости потепления и даже некоторое локальное похолодание в течение одного-двух десятилетий с последующим более быстрым потеплением и в Арктике, и на полшарном (глобальном) уровне [12].

Какова роль различных естественных и антропогенных факторов в происходящих изменениях климата на разных временных интервалах? В таб-

лице 1 представлены оценки вклада парниковых газов, а в таблице 2 — вклада естественных вариаций (АМО) в тренды приповерхностной температуры для предыдущих десятилетий на временных интервалах разной продолжительности (относительно современного режима), полученные с использованием многолетних данных с конца XIX в. (наряду с оценками причинности по Винеру—Грейнджеру) [5]. Аналогичные оценки получены на основе учёта различных ключевых процессов (мод) климатической изменчивости, связанных с Эль-Ниньо, тихоокеанской десятилетней осцилляцией (ТДО), тихоокеанской междесятилетней осцилляцией и антарктической осцилляцией, которые значимы и в Северном и в Южном полушариях.

Согласно полученным оценкам, вклад антропогенных факторов в изменения (тренды) приповерхностной температуры в арктических широтах составляет не более одной трети на временных интервалах до двух десятков лет, достигает двух пятых для 30-летнего периода, а на интервалах около полувека и более уже превышает половину [5]. При этом для других широтных зон Северного полушария и для Земли в целом роль антропогенных факторов оказывается более значимой. Это связано с большой естественной климатической изменчивостью в арктических широтах (см. табл. 2). Вклад ключевых мод климатической изменчивости на сравнительно коротких временных интервалах в пределах трёх десятилетий достигает и мо-

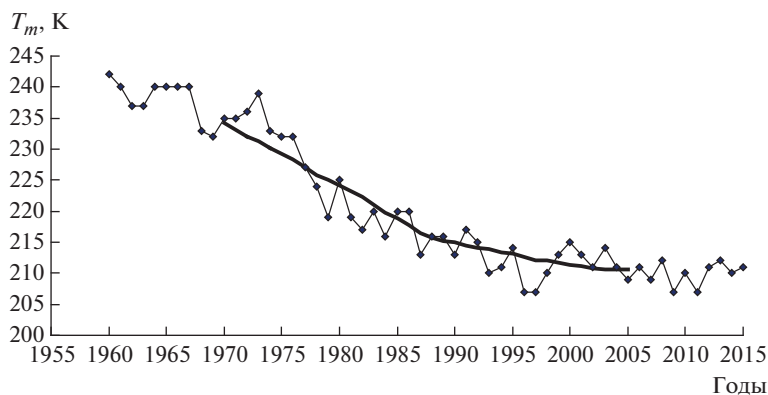


Рис. 5. Межгодовые вариации зимней температуры в области мезопаузы T_m (K) по измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 1960–2015 гг. Кривая характеризует температурные изменения при 21-летнем скользящем осреднении

жет превышать (по модулю) ± 0.2 K/десятилетие, а на интервалах около полувека и более их роль в вариациях приповерхностной температуры разных широт уже незначительна на фоне общего роста роли радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере. Вклад парниковых газов в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон в целом увеличивается и в последние десятилетия достигает и превышает 0.2 K/десятилетие.

Существенно, что при глобальном потеплении трансформируется вертикальная температурная стратификация атмосферы, характеризующая статическую устойчивость и конвективную неустойчивость тропосферы [14]. С изменениями вертикальной температурной стратификации атмосферы, её статической устойчивости связаны изменения конвективных процессов в атмосфере, режимов облачности, осадков, вихре-волновой активности. Генерация внетропических циклонов в результате бароклинной неустойчивости атмосферы зависит как от меридионального градиента температуры, так и от вертикальной температурной стратификации атмосферы. От климатической обратной связи через вертикальный градиент температуры в тропосфере существенно зависит арктическое усиление, чувствительность климата к различным воздействиям. Особенно существенные изменения отмечаются в высоких и средних широтах.

Глобальное потепление проявляется в тропосфере, а выше – в стратосфере и мезосфере, отмечается существенно более сильное понижение температуры (рис. 5) [15]. Это важный индикатор, характеризующий роль антропогенных факторов. Согласно работе [16] условие выхолаживания стратосферы, характеризуемой температурой T_{st} и интегральной функцией пропускания инфракрасного излучения D_{st} (<1), при увеличении содержания в атмосфере парникового (углекисло-

го) газа q с ростом приповерхностной температуры T ($dT/dq > 0$) можно представить в виде

$$(dD_{st}/dq) < 4(1 - D_{st})(dT_{st}/dT)(dT/dq)/T_{st}$$

($dT_{st}/dT < 0$ связано с $dD_{st}/dq < 0$). Модельные оценки вековых изменений температуры на разных широтах и высотах в атмосфере с конца XIX в., связанные с разными естественными и антропогенными воздействиями, свидетельствуют о значимости изменения содержания парниковых газов в атмосфере [17]. Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере. С изменениями с конца XIX в. концентрации сульфатного аэрозоля связано общее похолодание в тропосфере, а с изменениями концентрации атмосферного озона – потепление в тропосфере и похолодание в стратосфере, особенно в высоких широтах. Эти факторы вносят основной вклад в антропогенное воздействие на климатическую систему. Существенное влияние на формирование естественной климатической изменчивости, но не на современные долгопериодные (внутривековые) вариации, оказывает солнечная и вулканическая активность. Усиление потока солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы, отражается в общем потеплении всей атмосферы. В целом усиление вулканической активности приводит к похолоданию на поверхности земли и в тропосфере, сопровождающемуся потеплением в стратосфере. Суммарное воздействие как антропогенных, так и естественных факторов проявляется в потеплении тропосферы и похолодании стратосферы.

Климатические изменения последних десятилетий, характеризуемые общим увеличением приповерхностной температуры, проявляются во всех компонентах земной климатической системы – атмосфере, гидросфере (океане), деятель-

ном слое суши (литосфере), криосфере и биосфере. Существенные изменения отмечаются в режиме осадков, засух (пожаров) и наводнений, снежного покрова, влагосодержания почвы, речного стока, морских льдов, вечной мерзлоты, циклонической и антициклонической активности в атмосфере и др.

Тенденция увеличения в последние десятилетия частоты экстремальных гидрометеорологических явлений, в частности в российских регионах, связана с тем, что при потеплении согласно уравнению Клапейрона–Клаузиуса растёт влагоёмкость атмосферы, что увеличивает вероятность мощных осадков. В случае ослабления зональной тропосферной циркуляции при потеплении с уменьшением меридионального градиента температуры и усилением роли меридиональных процессов влага не столь эффективно переносится в глубь континентов, и это способствует большей пространственной неоднородности осадков и увеличению вероятности как избыточных осадков (наводнений), так и их дефицита (засух с пожарами) в сопредельных регионах [18, 19]. (Следует отметить, что в поясе широт от средних до субполярных зональная скорость ветра в тропосфере в условиях глобального потепления может увеличиваться при усилении субтропического струйного течения из-за охлаждения стратосферы.) На фоне большой изменчивости поля осадков проявляются существенные различия региональных тенденций и чувствительности общего количества осадков (Pr), их интенсивности (I_{Pr}) и вероятности (f_{Pr}):

$$(dPr/dT)/Pr = (dI_{Pr}/dT)/I_{Pr} + (df_{Pr}/dT)/f_{Pr}.$$

В среднеширотных российских регионах отмечаются различия тенденций изменения вероятности зимних и летних осадков. При потеплении проявляется общее увеличение и интенсивности, и частоты зимних осадков, а для летних осадков при общем росте интенсивности – уменьшение их частоты, что способствует возникновению летом как засух, так и наводнений.

Увеличение влагоёмкости атмосферы при потеплении повышает риск формирования интенсивных атмосферных вихрей, в том числе мощных циклонов и в тропических, и в средних и в полярных широтах, а также локальных вихрей типа смерчей/торнадо [20]. В связи с интенсификацией конвективных процессов отмечена тенденция роста конвективной облачности, в частности в Северной Евразии, положительные тренды конвективных осадков, повторяемости ливневых осадков [4, 21]. При усилении конвективной активности в атмосфере следует ожидать повышения молниевой активности и, как следствие, риска возникновения лесных пожаров. Получены оценки роста риска образования смерчей в реги-

онах Северной Евразии по современным данным реанализа для последних десятилетий и при возможных изменениях климата в XXI в., рассчитанных с применением ансамбля глобальных климатических моделей. Выявлен рост повторяемости условий, способствующих возникновению смерчей в Северной Евразии. Эта тенденция особенно характерна для Дальнего Востока и региона Чёрного моря. Формированию мощных конвективных процессов с аномальными осадками способствует повышение температуры поверхности моря. Рекордное наводнение на Амуре в 2013 г. было связано в том числе и с необычно высокой температурой поверхности Тихого океана [19].

В результате ослабления меридионального градиента температуры и зональной циркуляции в тропосфере от тропических до средних широт следует ожидать увеличения извилистости атмосферного струйного течения и вероятности меридиональных прорывов в субтропические и средние широты холодного северного воздуха или тёплого из тропиков с формированием соответствующих аномалий температуры и осадков.

Сильнейшие региональные аномалии в средних широтах обусловлены атмосферными блокировками зонального переноса в тропосфере. С ними связаны, в частности, аномально жаркое лето с пожарами в европейской части России летом 2010 г., рекордное наводнение на Амуре в 2013 г., холодные зимы в регионах Северной Евразии и Северной Америки в последние десятилетия [4]. Формирование режимов блокирования с чередованием положительных и отрицательных аномалий давления в атмосфере и температуры в сопредельных регионах проявляется при стационарировании в тропосфере волн Россби, распространяющихся с востока на запад в зональном геострофическом потоке, направленном в средних широтах с запада на восток. Длительные режимы со стационарированием волн Россби и блокировками зонального переноса в тропосфере увеличивают вероятность наводнений и пожаров в сопредельных областях. Летом 2019 г. достаточно резкая граница антициклонического и циклонического режимов в условиях атмосферного блокирования над Сибирью проходила через Иркутскую область. Это привело к наводнению в одной её части (Тулун), которая оказалась в области пониженного давления, и к пожарам в другой – в области повышенного давления.

По спутниковым данным отмечены региональные тенденции увеличения мощности лесных пожаров, в частности в Сибири [22]. При этом для последних двух десятилетий (2001–2019 гг.) выявлена значимая связь площади природных пожаров и вызванных ими эмиссий в атмосферу продуктов горения с блокировками на терри-

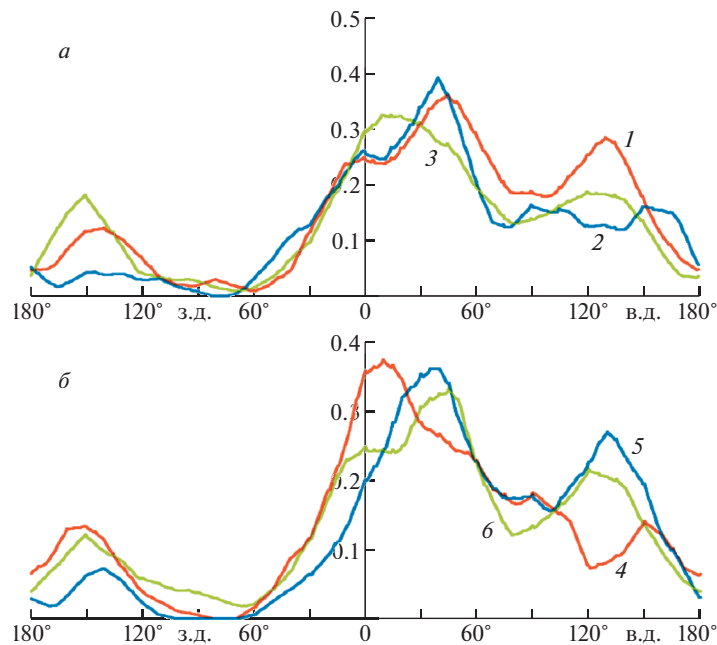


Рис. 6. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в зависимости от долготы, 1969–2013 гг., для лет, начинающихся (а) и заканчивающихся (б) в фазе Эль-Ниньо (1, 4), Ла-Нинья (2, 5) и нейтральной фазе (3, 6)

тории России [23]. Вклад в дисперсию межгодовых изменений площади пожаров и потоков продуктов горения в атмосферу, связанный с атмосферными блокировками, может достигать и даже превышать 40%. Проявляется тенденция увеличения плотности эмиссий продуктов горения в атмосферу, в том числе углекислого и угарного газов, а также мелкодисперсного аэрозоля, на фоне общего уменьшения площадей природных пожаров в первое 20-летие нынешнего века [23].

Согласно модельным оценкам при глобальном потеплении следует ожидать увеличения вероятности более длительных атмосферных блокировок и изменения режимов квазистационарных планетарных волн [24]. При этом ожидается усиление продолжительных блокировок, в том числе зимних, с которыми связаны морозные режимы над континентальными регионами. При изменениях температуры (T) изменяются характерные скорости распространения волн Россби (U_R) и условия их стационарирования $U = U_R$ в поле атмосферного течения (с зональной скоростью U) в зависимости от волнового числа m

$$(dU/dT)/U = -2(dm/dT)/m,$$

при $dU/dT < 0$ следует $dm/dT > 0$. Это означает, что ослабление зонального потока при потеплении способствует стационарированию волн Россби с большим волновым числом и следует ожидать чередования в тропосфере средних широт менее

протяжённых по долготе квазистационарных антициклонических и циклонических аномалий. Усиление блокинговой активности в атмосфере в сочетании с летними тенденциями иссушения во внутриконтинентальных среднеширотных регионах способствует повышению вероятности природных пожаров и их негативных последствий.

Формирование режимов атмосферного блокирования и связанных с ними региональных погодно-климатических аномалий зависит от межгодовых и междесятилетних климатических вариаций, связанных с крупномасштабными процессами типа Эль-Ниньо, Атлантической мультidesятилетней осцилляции, Тихоокеанской десятилетней осцилляции [19, 25]. Согласно рисунку 6, повторяемость летних атмосферных блокирований в средних широтах европейской части России заметно больше в годы, начинающиеся в фазе Ла-Нинья (как в 2021 г.) и фазе Эль-Ниньо (как в 2020 г.), по сравнению с начинающимися в нейтральной фазе [19]. При этом повторяемость блокирований в этих регионах заметно выше в годы, заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья или нейтральной (эти фазы наиболее вероятны и для конца 2021 г.) [9]. Значительные вариации повторяемости летних атмосферных блокирований в зависимости от фаз явлений Эль-Ниньо проявляются к востоку от Байкала. Причём этот эффект в восточной части Азии существенно заметнее в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо, а также в годы, заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья или нейтральной фазе. Наибольшая вероятность экс-

тремально высокой приповерхностной температуры и засухи в весенне-летние месяцы в регионах европейской части территории России возникает в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо и заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья с отрицательными аномалиями температуры в экваториальных широтах Тихого океана [25]. Так было, например, в 2010 г., когда летом на европейской территории России была аномальная жара с сильнейшими пожарами. В то же время для ряда регионов в азиатской части России (без Дальнего Востока) подобные процессы наблюдаются при продолжающейся фазе Эль-Ниньо с начала до конца года (как, например, в 2015 г.). Отмечена значимая связь с явлениями Эль-Ниньо гидрологического режима в бассейне Каспийского моря, в том числе его уровня. Следует отметить, что при глобальном потеплении возможно нарастание региональных эффектов в связи с тенденцией усиления и учащения квазициклических процессов типа Эль-Ниньо.

Рекордное амурское наводнение 2013 г., вызванное интенсивными продолжительными осадками в бассейне Амура, было обусловлено атмосферным блокированием над Тихим океаном в сезон дальневосточного муссона на фоне аномально высокой температуры поверхности океана в западной части Тихого океана в отрицательной фазе ТДО [9, 19]. Аномальному наводнению способствовало также повышенное влагосодержание почвы в речном бассейне вследствие увеличения зимнего снегозапаса в дальневосточном регионе. (Тенденция роста зимнего снегозапаса, проявляющаяся на территории России в последние десятилетия, связана с увеличением количества зимних осадков при потеплении.)

Рост ТПО способствует усилению конвективных процессов в атмосфере с усилением риска формирования экстремальных режимов ливневых осадков и наводнений в прибрежных регионах, тропических циклонов и их трансформации во внетропические [4, 9, 19]. Наряду с этим рост температуры морей и океанов способствует формированию так называемых “красных приливов” с вредоносным цветением водорослей в прибрежных зонах, как, например, в 2020 г. у полуострова Камчатка [9].

В связи с необходимостью соответствовать условиям Парижского соглашения (2015 г.) Рамочной конвенции ООН об изменении климата требуется адекватная количественная оценка всех источников эмиссий парниковых газов в атмосферу и их стоков, в том числе адекватный учёт углеродного баланса лесов, наземных и водных экосистем. В российских регионах наземные экосистемы, поглощая CO₂ из атмосферы, способствуют замедлению роста глобальной температуры у поверхности, а эмитируя в атмосферу CH₄,

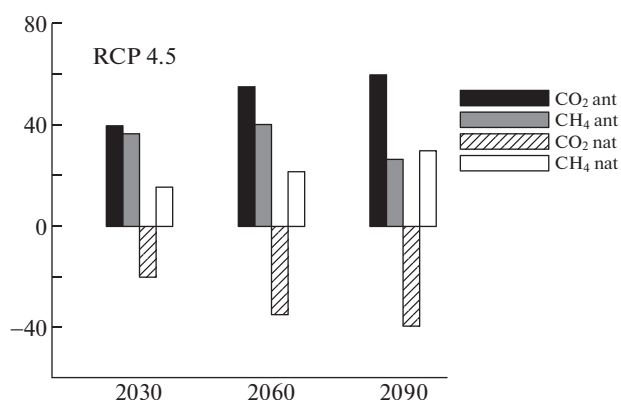


Рис. 7. Абсолютный потенциал (мК) антропогенных (CO₂ ant и CH₄ ant) и естественных (CO₂ nat и CH₄ nat) эмиссий в атмосферу CO₂ и CH₄ с территории России для интервалов 1990–2030 гг., 1990–2060 гг. и 1990–2090 гг. при сценарии RCP4.5

ускоряют потепление. Общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. При этом согласно полученным в работе [26] модельным оценкам роль этого замедляющего потепление эффекта в первой половине XXI в. растёт, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) к концу века уменьшается при различных анализировавшихся сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH₄ и уменьшением поглощения CO₂ наземными экосистемами (рис. 7).

Необходимо принимать во внимание потенциальные новые риски и возможности. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем, в том числе стабилизирующий эффект, обусловленный поглощением потоков CO₂ лесами. Необходимы количественные оценки на разных временных горизонтах роли ключевых источников и стоков парниковых газов, связанных с различными естественными экосистемами — от степных до тундровых, а также болотами, озёрами и др.

Особое значение имеют оценки новых рисков и возможностей в Арктике в связи с сильнейшими климатическими изменениями в высоких широтах. При быстром уменьшении протяжённости морских льдов в Арктическом бассейне и увеличении навигационного периода открываются новые перспективы на Северном морском пути. На рисунке 8 приведены мультимодельные прогнозистические оценки для начала и конца навигационного периода на Северном морском пути при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 в сопоставлении с оценками, полученными по спутниковым дан-

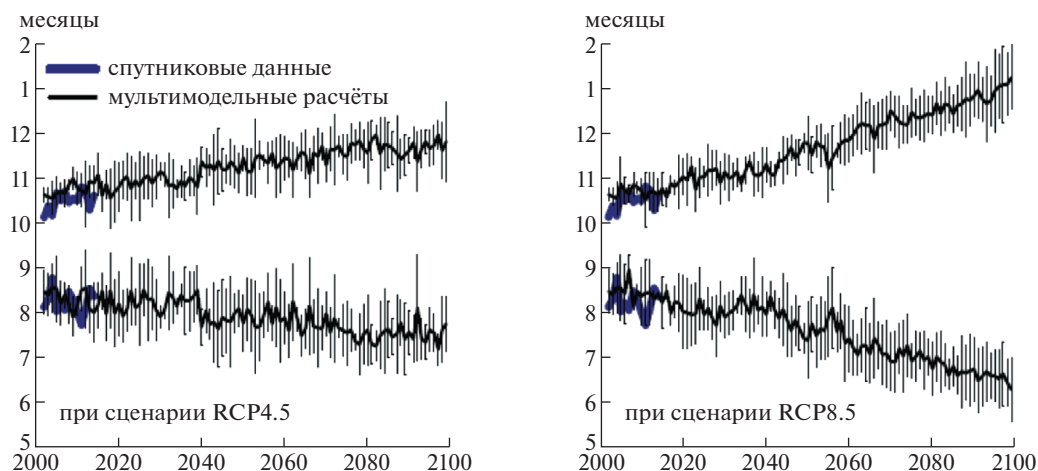


Рис. 8. Мультимодельные прогностические оценки начала и конца навигационного периода на Северном морском пути при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 в сопоставлении с оценками, полученными по спутниковым данным. Отмечены также соответствующие стандартные отклонения для ансамбля модельных оценок

ным [27]. При этом усиление морского волнения в арктическом бассейне создаёт новые риски, в том числе для работ на шельфе.

Важное значение имеют оценки эмиссии метана в атмосферу в связи с возможным разложением метангидратов, в том числе на российском арктическом шельфе, при потеплении и таянии вечной мерзлоты. В настоящее время эти оценки, в частности для морей Восточной Арктики, различаются на порядки [28–34]. Следует отметить, что эмиссию метана в атмосферу, отмечаемую по данным наблюдений на арктическом шельфе, можно связать с адаптацией термического режима донных отложений шельфа (с характерным временем порядка 10^4 лет) к режиму потепления в оптимуме голоцена [35, 36]. Согласно модельным оценкам [37–39], дополнительное глобальное потепление при учёте взаимодействия с природным метановым циклом (из-за соответствующей положительной климатической обратной связи) относительно мало на фоне ожидаемых температурных изменений в XXI в. при сценариях антропогенных воздействий.

Климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о возникновении новых явлений, характеризующих достижение определённого критического уровня происходящих изменений, в частности в Арктических регионах. Например, в последние годы выявлено образование воронок (кратеров) на Ямале и в сопредельных регионах [40, 41]. В работе [41] их возникновение связывается с разложением метангидратов неглубокого залегания с газовым выбросом в атмосферу в регионах распространения вечной мерзлоты на фоне потепления. Согласно [41] формирование метангидратов не-

глубокого залегания было возможно при высоком давлении под существовавшим в отмеченных регионах десятки тысяч лет назад ледовым щитом. То, что кратеры, подобные ямальским, образуются в настоящее время, свидетельствует о том, что современное потепление климата может быть не только сопоставимо с потеплением оптимума голоцена около 6 тыс. лет назад, но и превосходить его, по крайней мере на региональном уровне [41, 42]. В целом это согласуется с оценками, полученными в работе [43], для голоцена. В работе [41] также оценён риск образования кратеров в североамериканских регионах с вечной мерзлотой. Оценки критического уровня глобального потепления, при превышении которого режим роста антарктического ледового щита за счёт снегонакопления сменяется его деградацией вследствие интенсивного таяния, приводятся в работе [44]. Согласно полученным модельным оценкам, критический уровень, характеризующий качественную смену режима изменения уровня Мирового океана, может быть достигнут уже при глобальном потеплении на 1.6 К, тогда как в решениях Парижской конференции по изменению климата допускается увеличение глобальной приповерхностной температуры не более чем на 2 К. Полученная оценка критического уровня свидетельствует о целесообразности более жёстких ограничений для диапазона допустимых изменений климата (не более 1.5 К), вне которого возможны необратимые процессы.

В Климатической доктрине Российской Федерации (<http://kremlin.ru/events/president/news/6365>), принятой в 2009 г., отмечается: “Изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, которая выходит за рамки научной проблемы и представляет собой ком-

плексную междисциплинарную проблему, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации. Особенную обеспокоенность вызывает беспрецедентно высокая скорость глобального потепления, наблюдаемая в течение последних десятилетий. Современная наука предоставляет всё более веские основания в подтверждение того, что хозяйственная деятельность человека, связанная прежде всего с выбросами парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива, оказывает заметное влияние на климат”.

Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учётом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления у поверхности в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена. При этом современные климатические модели способны адекватно воспроизводить не только средние глобальные и региональные режимы и тенденции их изменений, но и особенности их изменчивости, связанные с региональной спецификой [4].

Что касается России, то при продолжении глобального потепления наряду с учётом новых возможностей, включая перспективы использования Северного морского пути, увеличение вегетационного периода роста растений и др., необходимо решать проблемы адаптации и регулирования в связи с негативными последствиями таяния вечной мерзлоты, увеличения риска наводнений, экстремальной жары и засух, лесных пожаров и т.п. [4, 12, 45–48]. В связи с происходящими и ожидаемыми изменениями климата для эффективного решения проблем адаптации к ним и их возможного регулирования необходим кардинальный пересмотр системы критериев оценки новых рисков, негативных последствий и потенциальных выгод. Требуется стратегический подход (не только на одно-два десятилетия), развитие общей системы взаимно согласованных региональных оценок предсказуемости сезонных климатических аномалий в межгодовой и междесятилетней изменчивости.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

В статье использовались результаты, полученные в рамках программы Президиума РАН “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования” и по проекту РНФ (19-17-00240).

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge—New York: Cambridge University Press, 2013.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их влиянии на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД, 2012.
4. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. № 4. С. 1–21.
5. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультidesятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 5–13.
6. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н. и др. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. № 3. С. 11–19.
7. Ganopolski A., Winkelmann R., Schellnhuber H.J. Critical insolation – CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception // Nature. 2016. V. 529. P. 200–204.
8. Cheng L., Abraham J., Jiang Zhu J. et al. Record-setting ocean warmth continued in 2019 // Adv. Atmos. Sci. 2020. V. 37. P. 137–142.
9. Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с тихоокеанской десятилетней осцилляцией // Доклады АН. Науки о Земле. 2021. № 2. С. 73–78.
10. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Росгидромет, 2017.
11. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I. et al. Arctic sea ice cover in connection with climate change // Izvestiya Atmos. Oceanic Phys. 2015. № 9. P. 889–902.
12. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 478–484.
13. Мохов И.И., Парфёнова М.Р. Связь протяжённости антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // Доклады АН. Науки о Земле. 2021. № 1. С. 71–77.
14. Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. № 4. С. 467–475.
15. Мохов И.И., Семёнов А.И., Володин Е.М., Дембицкая М.А. Изменения выхолаживания в области мезопазузы при глобальном потеплении по данным измерений и модельным расчётам // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 4. С. 435–444.
16. Мохов И.И. О влиянии CO₂ на термический режим земной климатической системы // Метеорология и гидрология. 1981. № 4. С. 24–34.
17. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008.

18. *Мохов И.И., Семёнов В.А., Хон В.Ч.* Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2003. № 2. С. 150–165.
19. *Мохов И.И., Хон В.Ч., Тимажев А.В. и др.* Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в связи с климатическими изменениями // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 81–120.
20. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС, 2018.
21. *Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
22. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.
23. *Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С.* Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокировками // Доклады АН. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 61–66.
24. *Мохов И.И., Тимажев А.В.* Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчётам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
25. *Мохов И.И., Тимажев А.В.* Оценки риска погодноклиматических аномалий в российских регионах в связи с явлениями Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 22–33.
26. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. № 1. С. 595–601.
27. *Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12 (2). 024010.
28. *Archer D.* Fate of fossil-fuel CO₂ in geologic time // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. C09S05.
29. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 64–70.
30. *Berchet A., Bousquet P., Pison I. et al.* Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16 (6). P. 4147–4157.
31. *Thornton B.F., Geibel M.C., Crill P.M. et al.* Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 5869–5877.
32. *Wählström I., Dieterich C., Pemberton P., Meier H.E.M.* Impact of increasing inflow of warm Atlantic water on the sea-air exchange of carbon dioxide and methane in the Laptev Sea // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2016. V. 121. P. 1867–1883.
33. *Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.* Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // Geosciences. 2019. V. 9. P. 251.
34. *Malakhova V.V.* The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. P. 012035.
35. *Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V. et al.* Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-Mar. Lett. 2005. V. 25. P. 167–182.
36. *Malakhova V.V., Eliseev A.V.* The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // Glob. Planet. Change. 2017. V. 157. P. 18–25.
37. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др.* Учёт взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. № 2. С. 147–162.
38. *Володин Е.М.* Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. № 2. С. 163–170.
39. *Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др.* Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Н.Г. Яковлева. М.: МАКС Пресс, 2016.
40. *Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О. и др.* Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. № 2. С. 15–25.
41. *Аржанов М.М., Мохов И.И.* Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // ДАН. 2017. № 4. С. 456–460.
42. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В.* Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады АН. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 27–32.
43. *Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C.* A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years // Science. 2013. V. 339. P. 1198–1201.
44. *Мохов И.И.* Российские климатические исследования в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 5. С. 624–640.
45. *Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А. и др.* Основы оптимальной адаптации экономики России к опасным проявлениям погоды и климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 5–14.
46. Исследование возможностей стабилизации климата с помощью новых технологий. М.: Росгидромет, 2012.
47. *Оганесян В.В., Стерин А.М.* Расчёт потенциального финансового ущерба от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации в 1987–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 97–108.
48. *Порфирьев Б.Н.* Экономическое измерение климатического вызова устойчивому развитию России // Вестник РАН. 2019. № 4. С. 400–407.