

УДК 551.581

МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН: СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2025 г. А. В. Елисеев^{a, b, *}, И. И. Мохов^{a, b}, М. М. Аржанов^a, С. Н. Денисов^a,
А. В. Чернокульский^a, К. Е. Мурышев^{a, b}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские Горы, 1, стр. 2, Москва, 119991, Россия

*e-mail: eliseev@ifaran.ru

Поступила в редакцию 08.09.2024 г.

После доработки 28.10.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Модель Земной климатической системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (МЗС ИФА РАН) включает в себя блоки, описывающие состояние атмосферы, океана, деятельного слоя суши, биогеохимические циклы, и ряд процессов, связанных с атмосферным электричеством и химией атмосферы. Она относится к классу климатических моделей промежуточной сложности (МПС) и участвует в соответствующих международных проектах сравнения. Особенностью модели является параметризация синоптической изменчивости в атмосфере и океане, позволяющая ускорить вычисления на два порядка. Модель реалистично воспроизводит изменения климата за период инструментальных измерений и может использоваться для оценок прошлых и будущих изменений климата на временных масштабах от десятилетий до тысячелетий. С использованием МЗС ИФА РАН впервые в мире получен ряд важных результатов, связанных с выявлением причин изменения климата в разные эпохи, анализом влияния биогеохимических циклов на климатические изменения, причинно-следственных связей в Земной климатической системе и сравнительной роли различных внешних природных и антропогенных факторов.

Ключевые слова: изменения климата, МПС, МЗС ИФА РАН

DOI: 10.31857/S0002351525010044, **EDN:** HFDJDC

1. ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения и их последствия — одна из основных проблем, стоящих перед человечеством. Выявление причин известных по наблюдениям или палеореконструкциям климатических изменений (а в более широком смысле — изменений состояния Земной климатической системы), а также оценка ожидаемых будущих изменений, возможны только с использованием глобальных климатических моделей. Подобные модели различной степени детальности в настоящее время развиваются рядом мировых научных центров, в том числе Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук (ИФА РАН).

В конце 1970-х гг. была предложена зонально-осредненная версия климатической модели [Пету-

хов, 1980], в 1990-х гг. была разработана версия модели, учитывающая незональные вариации климата [Petoukhov et al., 1998]. В дальнейшем в модель были включены блоки углеродного и метанового [Мохов и др., 2006б; Елисеев и др., 2008; Mokhov et al., 2008; Денисов и др., 2013] циклов, а также блоком описания климатообразующих процессов атмосферного электричества [Елисеев и др., 2019а], что позволяет отнести эту модель к классу моделей Земной климатической системы (МЗС).

Модель Земной климатической системы ИФА РАН характеризуется рядом упрощений, сделанных для повышения вычислительной эффективности (на 2–3 порядка относительно климатических моделей общей циркуляции; см. раздел 2).

Как следствие, она относится к классу МЗС промежуточной сложности (МПС; в англоязычной литературе для этого типа моделей используется термин Earth system models of intermediate complexity – EMICs) [Claussen et al., 2002; McGuffie and Henderson-Sellers, 2005; Weber, 2010; Climate Change, 2013; Елисеев, 2024; Переведенцев и др., 2024]. Модель Земной климатической системы ИФА РАН – единственная российская модель, относящаяся к такому классу климатических моделей и участвующая в соответствующих международных сравнениях (напр., [Petoukhov et al., 2005; Eby et al., 2013; Zickfeld et al., 2013; MacDougall et al., 2020]) и в подготовке оценочных докладов Межправительственной группы экспертов по изучению климата (МГЭИК) [Climate Change, 2013; 2021]. Наряду с моделью общей циркуляции Института вычислительной математики РАН [Математическое моделирование..., 2016; Володин, Грицун, 2020; Володин, 2023], она является одной из двух российских глобальных трехмерных климатических моделей с расчетами возможных изменений климата. В том числе, расчеты климатических изменений с МЗС ИФА РАН использовались в рамках программ РАН [Мохов, 2008; Мохов и др., 2008б,в], в материалах Совета-семинара при Президенте РАН по проблеме Киотского протокола [Мохов, 2006], в рамках программы Международного полярного года 2007–2008 гг. [Мохов и др., 2011].

На междесятилетних временных масштабах модель реалистично описывает реакцию климата на внешние воздействия (см. ниже). Изменения характеристик состояния климата и экосистем в модели при различных сценариях антропогенного воздействия на климат в XXI в. находятся в интервалах, полученных с ансамблями современных моделей. При этом вычислительная эффективность МЗС ИФА РАН позволяет проводить ансамблевые численные расчеты суммарной длительностью до 10^5 лет с анализом зависимости полученных результатов от начальных условий, управляющих параметров модели или сценариев внешних воздействий на систему [Мохов и др., 2006а,б; 2008а; 2012; Muryshev et al., 2017; Мохов и др., 2020].

Цель данной работы – краткое описание общей структуры и особенностей МЗС ИФА РАН, а также обзор основных результатов, полученных с ее использованием.

2. ОБЩАЯ СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЗС ИФА РАН

Как и другие современные модели Земной климатической системы, МЗС ИФА РАН состоит из блоков динамики атмосферы, океана, морского льда, деятельного слоя суши, биогеохимических циклов суши и океана и блока описания электрических процессов в атмосфере (молниевой активности, рис. 1).

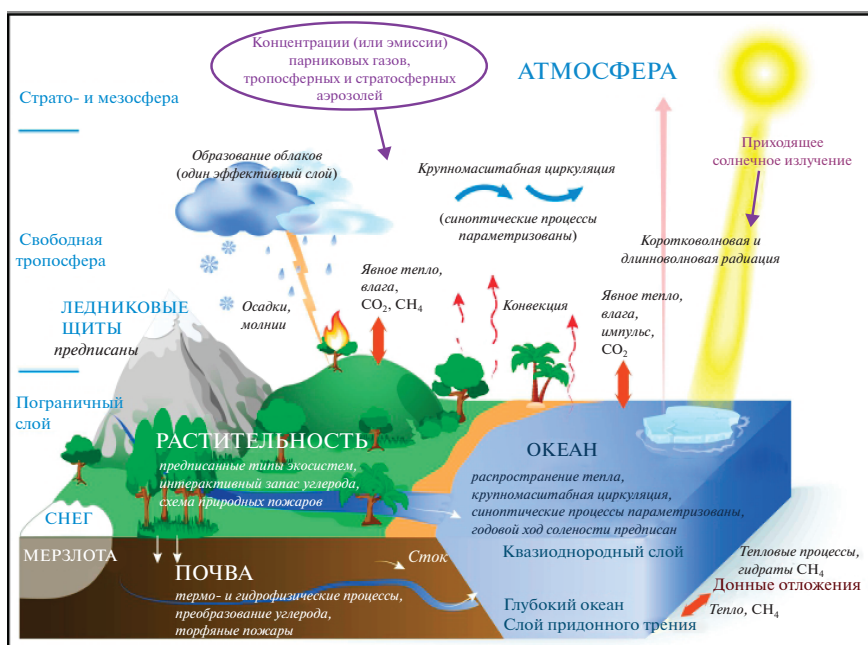


Рис. 1. Общая структура МЗС ИФА РАН

Атмосферный блок МЗС ИФА РАН включает в себя блоки переноса коротковолновой и длинноволновой радиации, конвекции, образования облаков и осадков. В настоящее время в схеме переноса коротковолновой радиации учитывается влияние параметров земной орбиты, альбеда поверхности, характеристик облачности, водяного пара, озона и тропосферных и стратосферных сульфатных аэрозолей. В блоке переноса длинноволновой радиации учитывается температура и влажность атмосферы, облачность, углекислый газ, метан, закись азота и фреоны. Крупномасштабная динамика атмосферы (с пространственным и временным масштабами больше синоптических) описывается явно. Синоптические процессы параметризуются с использованием диффузионного приближения [Петухов, 1980]. Это позволяет существенно уменьшить время, необходимое для модельных расчетов. Гидрологический цикл атмосферы вычисляется в приближении постоянной по времени (но зависящей от географических и вертикальной координат) относительной влажности атмосферы. Кроме того, особенностью модели является представление профилей температуры, удельной влажности и концентрации сульфатных аэрозолей в атмосфере в виде универсальных функций. В частности, температура представляется в виде линейной функции от высоты над поверхностью в свободной тропосфере, стратосфере и мезосфере. Вертикальный градиент температуры при этом зависит от приповерхностной температуры в свободной тропосфере и задан в виде постоянных значений в стратосфере и мезосфере. Вертикальные профили удельной влажности и концентрации сульфатов в атмосфере являются экспоненциальными с вертикальным масштабом 1.8 км [Елисеев и др., 2007б]. В радиационном блоке модели облачность представлена единственным эффективным слоем с предписанной водностью. Однако для вычисления частоты молний модель дополнена схемой вычисления высоты конвективных облаков согласно [Eliseev et al., 2013]. Верхняя граница расчетного домена в атмосфере расположена на высоте 80 км.

Океанический блок МЗС ИФА РАН — статистически-динамическая модель с параметризацией синоптического обмена в диффузионном приближении. Кроме того, в океаническом блоке модели в настоящее время используется приближение постоянной по времени (но зависящей от

географических и вертикальной координат) солености. Характеристики морского льда в МЗС ИФА РАН рассчитываются в зависимости от приповерхностной температуры и температуры поверхности океана [Петухов, 1980].

Блоком деятельного слоя суши является детальная модель термо- и гидрофизики почвогрунта [Аржанов и др., 2008] с глубиной расположения нижней границы расчетного домена более 63 м и высоким (5 см) вертикальным разрешением в верхнем 10-метровом слое. Такая модель позволяет проводить вычисления даже для временных горизонтов в тысячелетия. Особенностью модели является учет влияния торфа и мхов на термофизические параметры почвогрунта.

В более ранних версиях МЗС ИФА РАН использовался глобально осредненный модуль углеродного цикла [Мохов и др., 2006в, г; Елисеев, Мохов, 2007а; Eliseev, Mokhov, 2007; Mokhov et al., 2008]. Блок суши этого модуля основан на вычислении суммарных по суши интенсивностей фотосинтеза наземной растительности, ее дыхания и разложения органики почвы. Соответствующий блок океана основан на модели Бакастоу с учетом зависимости констант скорости химических реакций неорганического углеродного цикла океана от температуры [Muryshv et al., 2017]. Органическая часть углеродного цикла океана не учитывается. Модуль замыкается уравнением баланса массы CO_2 в атмосфере в приближении хорошо перемешанного газа. Впоследствии наземная часть углеродного цикла была заменена среднегодовой пространственно-распределенной моделью, учитывающей, наряду с фотосинтезом наземной растительности и автотрофным и гетеротрофным дыханием, также природные пожары и интенсификацию гетеротрофного дыхания за счет культивации [Eliseev, Mokhov, 2011; Елисеев, 2011]. Океаническая и атмосферная части блока углеродного цикла при этом остались без изменений. В дальнейшем наземная часть углеродного цикла модели была расширена учетом влияния диффузной солнечной радиации и содержания диоксида серы в воздухе на интенсивность фотосинтеза растительности [Елисеев, 2012, 2015; Елисеев и др., 2019б], учетом подсерточной неоднородности типов растительности в модельной ячейке [Елисеев, Сергеев, 2014] и рядом улучшений в блоке описания природных пожаров — учетом, наряду с верховыми и низовыми пожарами, также торфяных пожаров

[Елисеев и др., 2014; Eliseev et al., 2014b] и учетом естественных и антропогенных источников возгорания и деятельности пожарных служб на характеристики природных пожаров [Елисеев и др., 2017]. Распределение типов растительности при получении представленных в данной работе результатов предписывалось.

Модель Земной климатической системы ИФА РАН включает блок метанового цикла [Денисов и др., 2013, 2015], более ранние версии этого блока использовались в [Мохов и др., 2007, 2008; Елисеев и др., 2008]. Его особенностью является учет отклика интенсивности эмиссий метана влажными экосистемами при изменениях климата. Модуль замыкается уравнением баланса массы CH_4 в атмосфере в приближении хорошо перемешанного газа с простой параметризацией времени жизни метана в атмосфере [Денисов и др., 2019].

Блок электрических процессов в атмосфере в настоящее время описывает частоту молний (в том числе как источников возгорания для природных пожаров). Вычислительная схема основана на схеме Прайса-Ринда [Price and Rind, 1992], но учитывает не отдельные грозовые облака, а статистические ансамбли таких облаков [Елисеев и др., 2019a] с оценкой характеристик облаков согласно [Eliseev et al., 2013].

Географическое распределение ледовых щитов их толщина в представленных в данной работе расчетах предписывались. Ледники меньшего размера в модели не учитываются.

Горизонтальное разрешение МЗС ИФА РАН составляет 4.5° широты и 6° долготы с 8 уровнями по вертикали в атмосфере, 3 уровнями в океане, 300 уровнями в почвогрунте, до 40 уровней в снежном покрове. В наземном биогеохимическом модуле учитываются 7 функциональных типов растительности (один из которых зарезервирован под сельскохозяйственные растения). Модель интегрируется с шагом по времени, равным 5 сут. В однопроцессорном режиме (процессор Intel Core i9-9900K) МЗС ИФА РАН затрачивает 17 с на вычисление одного модельного года (без учета затрат на сохранение вывода).

Вследствие используемых приближений и параметризаций современная версия МЗС ИФА РАН не рассчитана на воспроизведение короткопериодной климатической изменчивости. При этом отклик модели на внешние воздей-

ствия в целом подобен соответствующему отклику других современных моделей с близкими значениями метрик климатической чувствительности. Эти метрики для МЗС ИФА РАН:

- равновесное изменение глобально усредненной среднегодовой приповерхностной температуры атмосферы (T_g) при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере $q\text{CO}_2$ для МЗС ИФА РАН составляет 2.2°C , что находится в нижней части интервала для моделей ансамбля CMIP6 (Climate Models Intercomparison Project, от 1.8 до 5.6°C [Meehl et al., 2020]);
- транзитивный отклик климата, определяемый как увеличение T_g через 70 лет после начала интегрирования в численном эксперименте с увеличением $q\text{CO}_2$ от доиндустриального значения на 1% в год, равный 1.5°C , что также находится в нижней части интервала для моделей ансамбля CMIP6 (от 1.3 до 3.0°C [Meehl et al., 2020]);
- транзитивный отклик климата (от современного состояния) на единичную интенсивность эмиссий CO_2 в атмосферу, равный $1.5^\circ\text{C}/\text{ЭгC}$ — также в нижней части ансамбля современных моделей (моделей CMIP6 и ряда современных МПС, от 1.1 до $2.7^\circ\text{C}/\text{ЭгC}$ [MacDougall et al., 2020]);
- гидрологическая чувствительность модели, определяемая через изменение количества глобальных годовых осадков на единичное изменение T_g , равна $6\%/^\circ\text{C}$, что заметно больше соответствующего значения для моделей CMIP6 (от 2.1 до $3.1\%/^\circ\text{C}$ [Pendergrass, 2020]).

3. ОТКЛИК МОДЕЛИ НА ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

3.1. Индустриальный период

Анализ отклика модели на внешнее воздействие в эпохи прошлого и в индустриальный период необходим как для объяснения этих изменений, так и для верификации самой модели [Елисеев, 2023]. В данном и последующем разделах указанный анализ проведен для версии модели, доступной с 2019 г. Анализ соответствующего отклика с предыдущими версиями модели доступны в [Petoukhov et al., 1998; Мохов и др., 2002, 2005; Petoukhov et al., 2005; Eliseev, Mokhov, 2008; Mokhov, Eliseev, 2008; Мохов, Елисеев, 2012; Eby et al., 2013].

С моделью был проведён численный эксперимент по воспроизведению климата индустриального периода (1850–2015 гг.). В нем учитывались изменения содержания углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере, сульфатных аэрозолей в тропосфере и стратосфере (последние являются вулканическими), солнечной постоянной, распределения сельскохозяйственных угодий и плотности населения. Большая часть этих воздействий была задана в соответствии с условиями эксперимента “historical” проекта CMIP6 [Eyring et al., 2016] за исключением тропосферных сульфатов и плотности населения, которые (ввиду недоступности в период проведения численных экспериментов) были заданы по данным соответствующих численных экспериментов проекта CMIP5 (CMIP, phase 5) [Taylor et al., 2012]. В качестве начальных условий интегрирования использовалось равновесное доиндустриальное состояние модели.

Для доиндустриального периода значение T_g в модели равно 13.5°C (рис. 2а), что близко к эмпирической оценке 13.4°C по данным HadCRUT5 [Morice et al., 2021]. Глобальная интенсивность осадков в модели составляет 885 мм/год (рис. 2б) – несколько ниже эмпирической оценки 1126 мм/год (с интервалом неопределенности от 1007 до 1157 мм/год) по данным табл. 8.1 из [Climate Change, 2021] для 1991–2010 гг. Подобные и даже большие погрешности характерны и для современных моделей Земной климатической системы, основанных на моделях общей циркуляции [Liu et al., 2014].

Модель в целом воспроизводит пространственную структуру приповерхностной температуры T и осадков P как в среднем за год, так и для отдельных сезонов, хотя недооценивает незональные особенности обеих переменных в сравнении с данными HadCRUT5 и GPCPv3.2 (Global Precipitation Climatology Project, version 3.2) [Huffman et al., 2023] соответственно. Занижение незональных особенностей климата частично связано с относительно грубым горизонтальным разрешением модели и частично с упрощениями динамического блока модели.

Модель в целом воспроизводит изменения приповерхностной температуры воздуха в XX в., но недооценивает естественную межгодовую и междесятилетнюю изменчивость климата и завышает похолодание после вулканических извержений (рис. 2а). Недооценка естественной изменчивости проявляется и в других современных МПС [Claussen et al., 2002; Petoukhov et al., 2005; Weber, 2010; Eby et al., 2013; Zickfeld et al., 2013]. В частности, увеличение средней T_g от 1850–1900 гг. к 2000–2015 гг. (последние годы численного эксперимента “historical”) составляет 0.8°C , что хорошо согласуется с оценкой по данным HadCRUT5 (0.9°C). Разница между этими (модельными и наблюдательными) оценками может отражать либо вклад естественной изменчивости в среднее глобальное потепление XX–начала XXI вв., либо неучет парникового эффекта фреонов в данном численном эксперименте. Подобно данным наблюдений и другим моделям, это потепление больше над сушей, чем

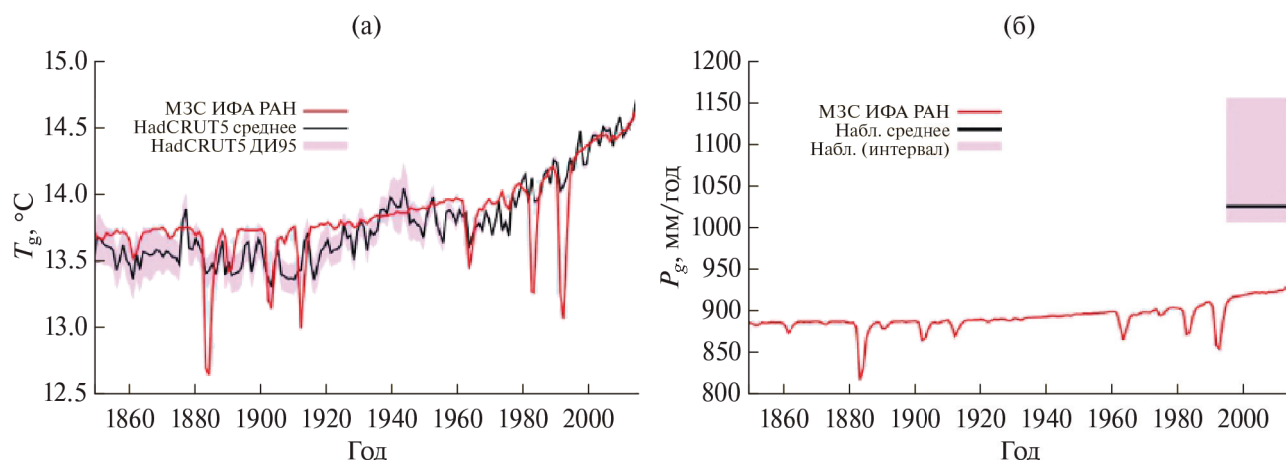


Рис. 2. Средняя глобальная температура у поверхности T_g по расчетам с МЗС ИФА РАН в сравнении с данными HadCRUT5 (а) и глобальных годовых осадков P_g (б) в сравнении с данными табл. 8.1 из [Climate Change, 2021]

над океаном, а также больше в полярных регионах по сравнению с более низкими широтами (рис. 3а). Соответствующие коэффициенты линейного тренда согласуются с эмпирическими оценками (рис. 2.11 из [Climate Change, 2021]).

Количество осадков в модели растет в XX–начале XXI вв. (рис. 2б). При глобальном и годовом осреднении среднее значение P_g для 2000–2015 гг. больше соответствующего среднего для 1850–1900 гг. на 4.7%. В соответствии с завышенной гидрологической чувствительностью модели, это заметно завышает и соответствующий коэффициент линейного тренда по данным GPCPv3.2 (табл. 2.6 из [Climate Change, 2021]). Увеличение осадков наиболее значимо в средних широтах над Евразией (рис. 3б), что согласуется с результатами рис. 2.15b из [Climate Change, 2021]. Однако модель может значительно завышать чувствительность осадков к глобальному потеплению над океаном. Отметим, что несмотря на общее завышение чувствительности осадков к климатическим изменениям, модель частично воспроизводит уменьшение осадков в регионах сведения лесов с целью развития сельского хозяйства (в частности, в причерноморском регионе и на юго-востоке Северной Америки) [Елисеев и Мохов, 2011].

Кроме того, МЗС ИФА РАН воспроизводит общее уменьшение годового хода в средних и субполярных широтах (большее потепление зимой, чем летом) [Eliseev and Mokhov, 2003; Eliseev et al., 2004].

С МЗС ИФА РАН проводился анализ изменений Северо-Атлантического колебания [Handorf et al., 1999; Мохов и др., 2000] и стока крупнейших российских рек [Мохов и Хон, 2002а,б; Мохов и др., 2003].

3.2. Голоцен

С МЗС ИФА РАН был проведен (впервые в России) численный эксперимент по воспроизведению климата голоцена (последние 10 тыс. лет) [Мохов и др., 2020]. При этом учитывались следующие воздействия:

- изменения параметров орбиты Земли, которые рассчитываются внутри модели по алгоритму Берже [Berger, 1978];
- изменение солнечной постоянной, реконструированное по данным отложений ^{10}Be в ледовых кернах [Steinilbert et al., 2009];
- оптическая глубина стратосферных (вулканических) аэрозолей (только для 500–2000 гг. н.э.) [Gao et al., 2008];
- концентрации хорошо перемешанных парниковых газов в атмосфере по данным ледового бурения: для интервала 10–2 тыс. лет назад (л.н.) концентрация CO_2 была задана по данным ледового бурения [Lüthi et al., 2008], концентрация CH_4 – в виде полусуммы (для учета межполярного градиента концентрации) данных ледового бурения на станции Доум-Си в Антарктиде [Flückiger et al., 2002] и на станции Саммит-Кэмп в Гренландии

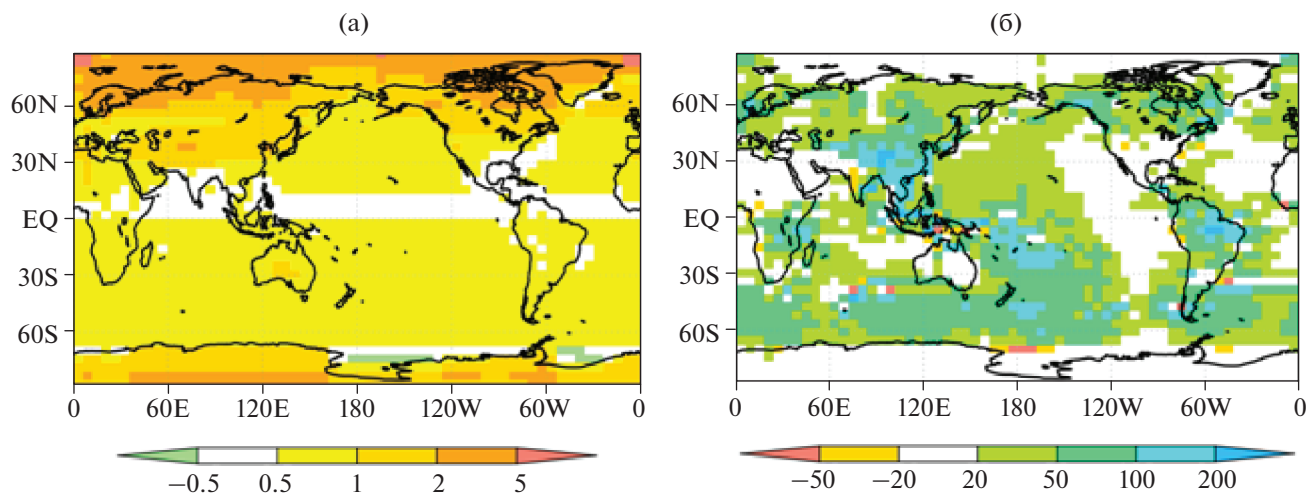


Рис. 3. Изменения среднегодовой приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$, а) и годовых осадков (мм/год, б) от 1850–1900 гг. к 2000–2015 гг. в расчетах с МЗС ИФА РАН

[Blunier et al., 1995], N_2O — по [Sowers et al., 2003]; для интервала 2–0 тыс. л.н. все эти концентрации были заданы по данным проекта CMIP6 [Meinshausen et al., 2017];

- изменение площади посевов и пастбищ и по данным HYDE-3.2 (History Database of the Global Environment, version 3.2) [Klein Goldewijk et al., 2017];
- изменение плотности населения по тем же данным;
- содержание тропосферных сульфатов на единицу площади поверхности Земли по данным проекта CMIP5 [Lamarque et al., 2010]; при этом считается, что данные для 1850 г. соответствуют сульфатам естественного происхождения и являются представительными для всего голоцена;
- распределение ледовых щитов было задано в соответствии с современным состоянием.

Начальным условием интегрирования было равновесное состояние модели, соответствующее граничным условиям для 10 тыс.л.н.

В указанном расчете при глобальном и среднегодовом осреднении температурный оптимум середины голоцена не проявляется (рис. 4а). Это согласуется с рядом современных данных [Osman et al., 2021; Erb et al., 2022], где этот максимум также не проявляется или слабо выражен. Следует отметить значительные различия между реконструкциями температуры для голоцена [Wanner et al., 2008; Marcott et al., 2013; Marcisek et al., 2019; Kaufman et al., 2020;

Kaufman, Broadman, 2023]. Однако в средних и субполярных широтах летом наблюдается температурный максимум (напр., рис. 5). Следует отметить, что температурный максимум середины голоцена моделью может недооцениваться из-за неучета вариаций ледовых щитов в первой половине голоцена (Abe-Ouchi et al., 2013), а также ввиду неучета сдвига растительных зон при климатических изменениях (Texier et al., 1997). Кроме того, модель в основном воспроизводит долгосрочные региональные изменения приповерхностной температуры в течение последних двух тысячелетий в сравнении с реконструкцией PAGES2k (Past Global Changes, проект для последних 2 тыс. лет; см. рис. 5).

Таким образом, можно утверждать, что, хотя на глобальном уровне современный климат теплее климата середины голоцена, современные температурные режимы для отдельных регионов могут не достигать ещё уровня максимального потепления в оптимум голоцена.

Изменение глобальных осадков P_g на межтысячелетних масштабах тесно связано с соответствующим изменением T_g (не показано). Однако эта связь нарушается в середине голоцена из-за особенностей широтного и сезонного распределения солнечной энергии, влияющей на интенсивность испарения.

Площадь выгорания из-за природных пожаров S_f постепенно увеличивается в течение голоцена из-за роста числа антропогенных возгораний (рис. 4б). Однако в середине XX в. эта площадь начинает уменьшаться за счёт влияния

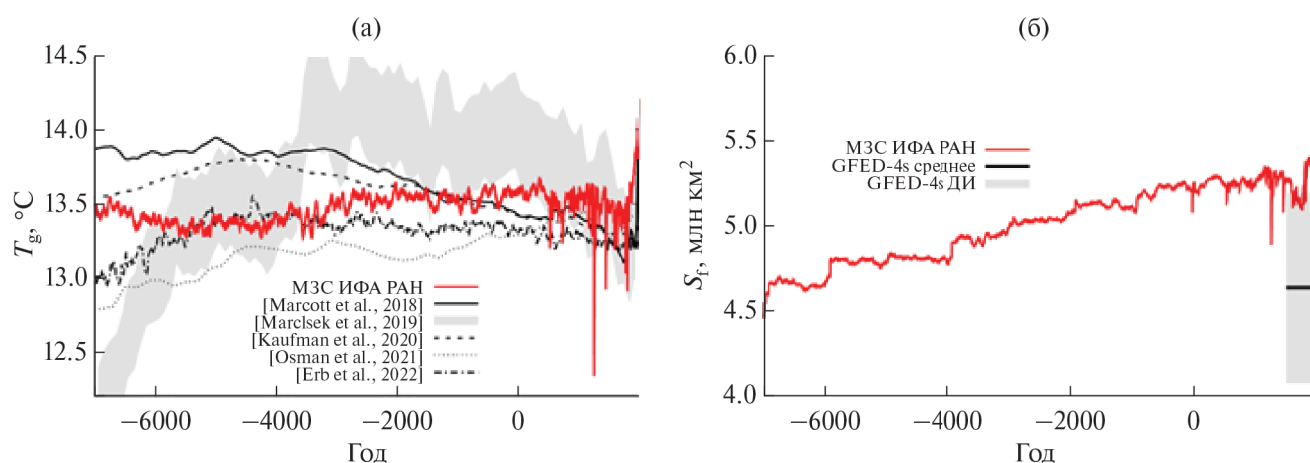


Рис. 4. Средняя глобальная температура приповерхностного воздуха T_g в голоцене (а) и площади выгорания из-за природных пожаров (б) по расчётам с МЗС ИФА РАН

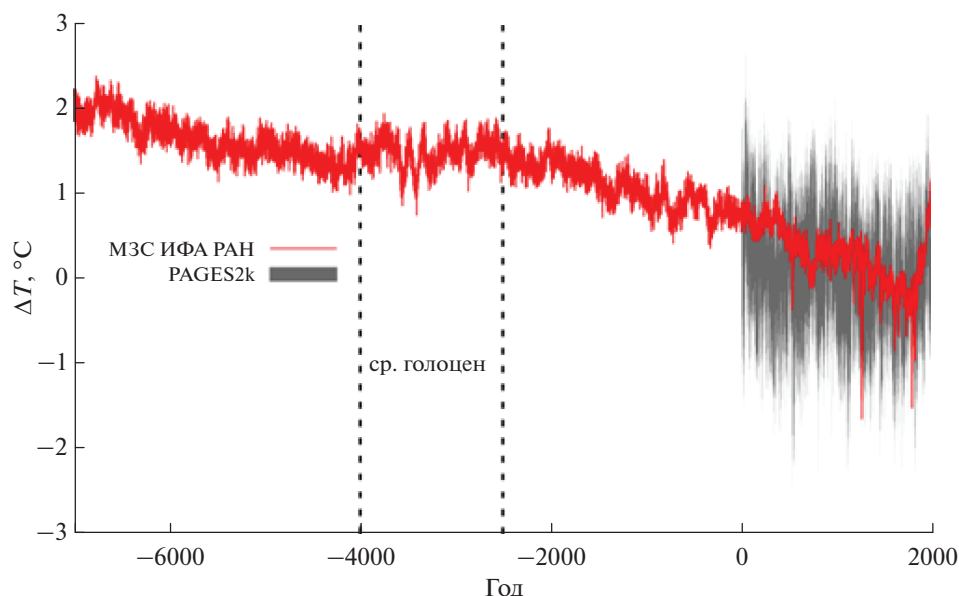


Рис. 5. Аномалии (относительно среднего для 1500–2000 гг.) приповерхностной температуры в регионе Европы (35–70° с.ш., 10–40° ов.д.) по расчетам с МЗС ИФА РАН в сравнении с данными реконструкции PAGES2k

подавления пожаров человеком. Для современного периода модель несколько завышает значение S_f по сравнению с данными GFED-4s (Global Fire Emission Database, version 4s) [Randerson et al., 2012]. Отметим, что в настоящее время только относительно небольшое число современных МЗС способно воспроизводить природные пожары с очень большим разбросом современной площади выгорания [Kloster, Lasslop, 2017].

3.3. Изменения климата в XXI в.

С предыдущими версиями МЗС ИФА РАН были выполнены оценки изменений климата при задании антропогенного воздействия на климат в соответствии со сценариями семейств IS92 [Climate Change, 1992] (см. [Мохов и др., 2002]), SRES (Special Report on Emission Scenarios) [Climate Change, 2001] (см. [Мохов и др., 20056]) и RCP (Representative Concentration Pathways) [Lamarque et al., 2010; van Vuuren et al., 2011; Taylor et al., 2012] (см [Мохов, Елисеев, 2012]; отметим, что сценарии RCP также предусматривали будущее изменение солнечной постоянной в виде повторяющегося 11-летнего цикла, соответствующего солнечному циклу 23). Кроме того, ранее с моделью были также проведены расчеты при сценариях антропогенного воздействия на климат, подготовленных в Московском энергетическом институте [Аржанов и др., 2012].

К настоящему времени с моделью также проведены соответствующие оценки для 2015–2200 гг. при сценариях семейства SSP (Shared Socio-economic Pathways) [Gidden et al., 2019], входящие в условия проекта CMIP6. При этом учитывались следующие воздействия на климат:

- интенсивность антропогенных выбросов CO_2 из-за сжигания ископаемого топлива и производства цемента;
- изменения концентраций CH_4 и N_2O в атмосфере;
- изменение площади посевов и пастбищ;
- изменение солнечной постоянной (в соответствии со стандартным сценарием ref CMIP6; см. ниже);
- содержание сульфатов в тропосфере на единицу площади;
- плотность населения.

Последние два воздействия были взяты из соответствующих сценариев RCP (таблица соответствия между сценариями RCP и SSP доступна в [Gidden et al., 2019]). Наличие в модели блока углеродного цикла позволяет рассчитывать связанные с землепользованием выбросы углекислого газа в атмосферу и вычислять концентрацию CO_2 в атмосфере $q\text{CO}_2$. В качестве начальных условий интегрирования использо-

валось состояние, достигаемое моделью к концу 2014 г. в численном эксперименте CMIP6 “historical”.

В этих численных экспериментах $q\text{CO}_2$ в 2017 г. достигает 407 млн^{-1} (рис. 6а) в согласии с данными наблюдений [Le Quèrè et al., 2018]. По расчетам с МЗС ИФА РАН в 2050 г. $q\text{CO}_2$ вырастет относительно 2017 г. на $15\text{--}136 \text{ млн}^{-1}$ в зависимости от сценария. К 2100 г. концентрация CO_2 в атмосфере в 2100 г. в зависимости от сценария будет либо меньше (на 37 млн^{-1} при сценарии SSP1-2.6), либо больше (на 49 млн^{-1} при сценарии SSP2-4.5 и на 600 млн^{-1} при сценарии SSP5-8.5), чем в 2017 г. Содержание CO_2 в атмосфере в расчетах с моделью меньше, чем в исходных сценариях SSP, подготовленных CMIP6. В XXII столетии при сценарии SSP2-4.5 $q\text{CO}_2$ практически стабилизируется (возрастая лишь на 13 млн^{-1}), при сценарии SSP2-4.5, уменьшается до 347 млн^{-1} при сценарии SSP1-2.6 и достигает 2048 млн^{-1} при сценарии SSP5-8.5.

При сценарии SSP1-2.6 T_g достигает максимума (на 1.0°C выше среднего для 2000–2015 гг.) в 2070-х гг. (рис. 6б), после чего начинает уменьшаться, так что ее изменение ΔT_g относительно среднего для 2000–2015 гг. к 2100 г. равно 0.9°C , а к 2200 г. — 0.2°C . При сценарии SSP2-4.5 ΔT_g к концу XXI века составляет 1.6°C , а концу XXII в. — 1.7°C . Наибольший рост T_g относительно среднего для 2000–2015 гг. отмечается при сценарии SSP5-8.5 — на 2.7°C к 2100 г. и на 5.2°C к 2200 г. С учетом потепления в эксперименте “historical”, потепление с 1850–1900 гг. к 2090–2100 гг. при этих сценариях равно 1.8 , 2.7 и 3.5°C

соответственно. Эти значения ΔT_g находятся в нижней части интервалов, характерных для моделей ансамбля CMIP6 (рис. 4.2 из [Climate Change, 2021]).

Потепление климата наиболее заметно в средних и субполярных широтах Северного полушария, особенно над сушей (рис. 7). К концу XXI в. над сушей изменение среднегодовой температуры ΔT относительно среднего значения для 2000–2015 г. составляет $2\text{--}5^\circ\text{C}$ в зависимости от сценария. К концу XXII в. при сценарии SSP1-2.6 ΔT уменьшается и не превышает 2°C . Подобно полученному для T_g , при сценарии SSP2-4.5 среднегодовая температура в XXII столетии изменяется незначительно, тогда как при сценарии SSP5-8.5 среднегодовое потепление относительно среднего для 2000–2015 г. над сушей средних и субполярных широт достигает $10\text{--}15^\circ\text{C}$, а над Северным Ледовитым океаном ΔT превышает 15°C .

Изменение других климатических переменных в расчетах с МЗС ИФА РАН при сценариях SSP рассматриваются в последующих разделах.

3.4. Роль внешних воздействий в изменениях климата в XX–XXII вв.

С моделью были поставлены специальные эксперименты по выделению вклада воздействий различного типа в климатические изменения в индустриальный период. В частности, было показано, что, в согласии с данными [Climate Change, 2013, 2021] основная роль в конце XX–начале XXI вв. принадлежит антропогенному парниковому эффекту, который несколько

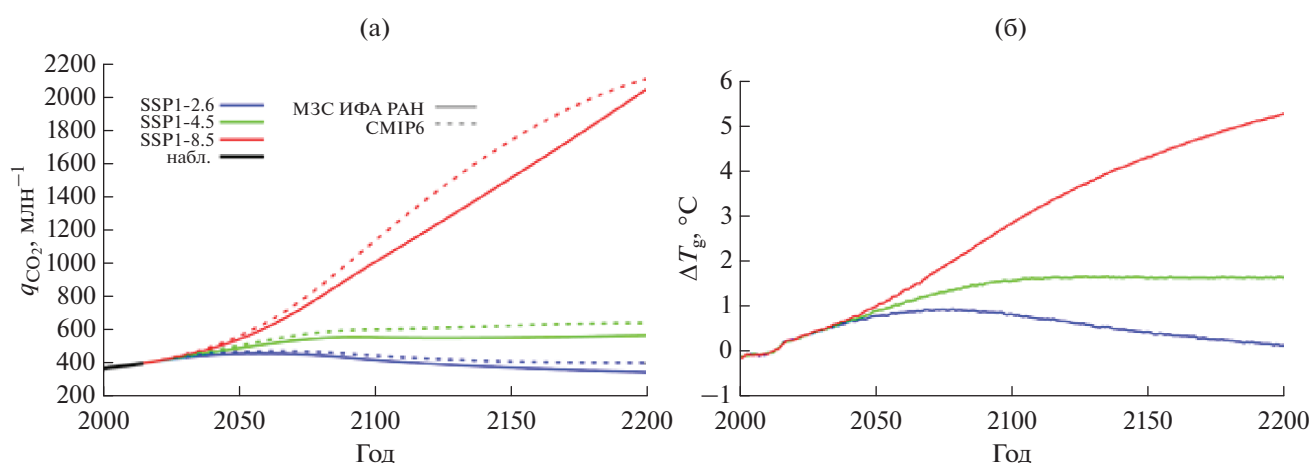


Рис. 6. Концентрация CO_2 в атмосфере (а) и изменение средней глобальной температуры приповерхностного воздуха относительно 2000–2015 гг. (б) при сценариях SSP

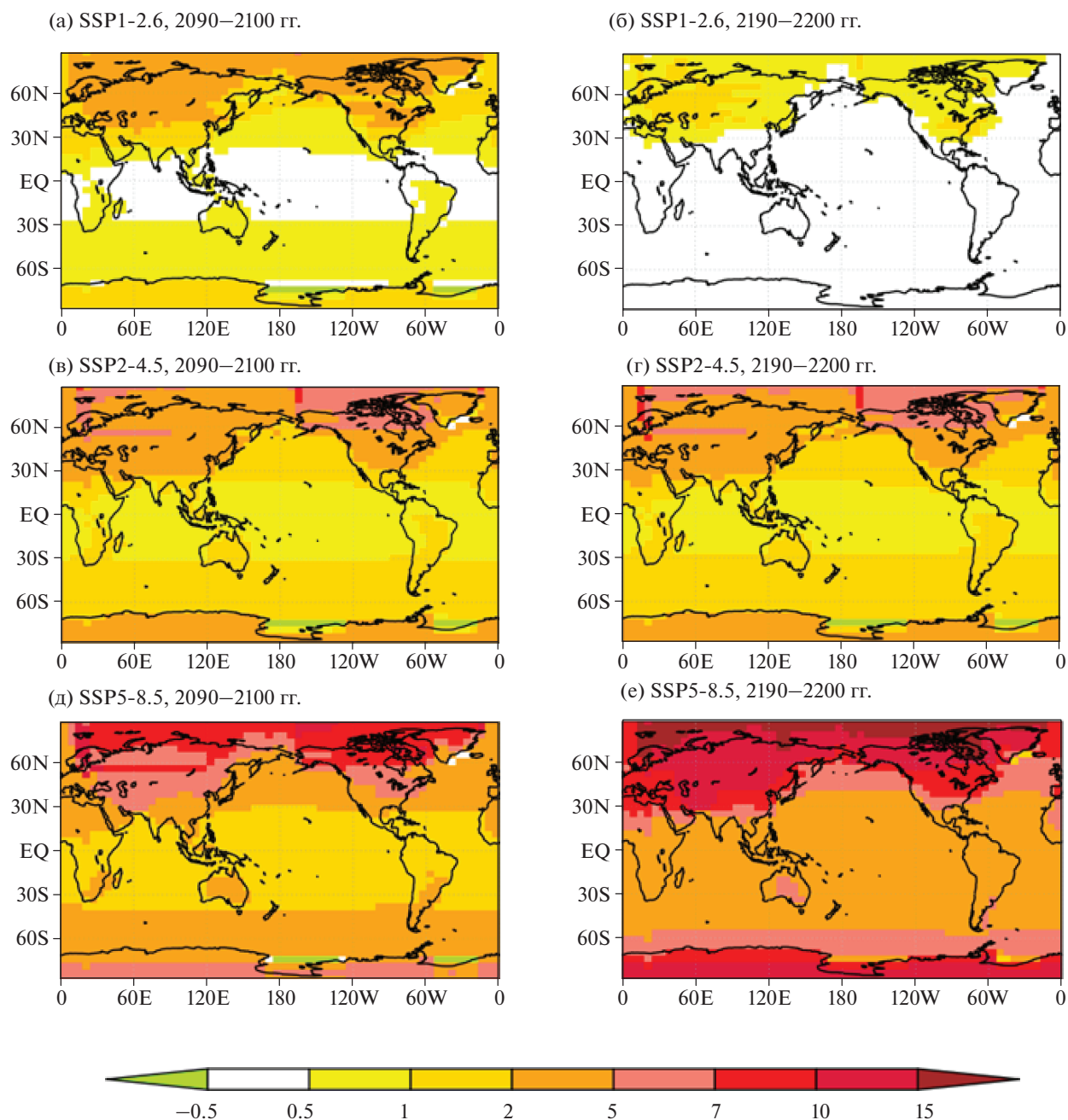


Рис. 7. Изменение приповерхностной температуры T в расчетах с МЗС ИФА РАН при сценариях SSP1-2.6 (а и б), SSP2-4.5 (в и г) и SSP5-8.5 (д и е) в 2090–2100 гг. (а, в, д) и в 2190–2200 гг. (б, г, е) относительно среднего за 2000–2015 гг.

компенсируется увеличением нагрузки антропогенных аэрозолей в тропосфере [Елисеев и др., 2007б]. В период с начала XVIII в. до середины XX в. на глобальном уровне также значительно влияние землепользования [Елисеев, Мохов, 2011], что согласуется также с результатами [Brovkin et al., 2006]. Вклад естественных воздействий (изменения солнечной постоянной и вулканическая активность) способен объяснить

не более 15% изменения температуры на вековом масштабе в индустриальный период [Мохов и др., 2006а; Елисеев, Мохов, 2008]. Последнее согласуется с [Lean, Rind, 2008; Zhou, Tung, 2010; Solanki et al., 2013; Schurer et al., 2014].

С МЗС ИФА РАН были проведены расчёты с выделением вклада различных воздействий (заданных по данным проекта CMIP6) в измене-

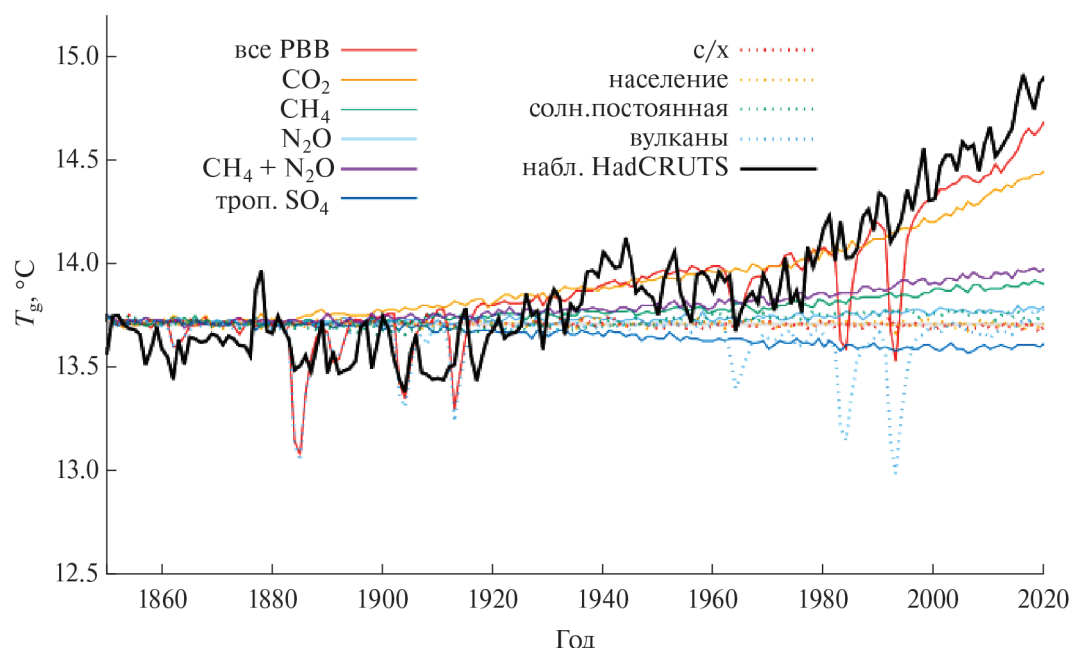


Рис. 8. Вклад различных воздействий в изменение климата индустриального периода по расчетам с МЗС ИФА РАН

ние климата индустриального периода [Метан и климатические изменения..., 2022]. Получено, что и для приповерхностной температуры, и для количества осадков примерно 2/3 вынужденного отклика связано с влиянием роста содержания углекислого газа в атмосфере (рис. 8). Следующим по важности внешним фактором (16–21% в зависимости от временного интервала) является накопление метана в атмосфере. Вклад изменения закиси азота в вынужденный отклик климата в XX в. составляет порядка нескольких процентов. Не более 10% изменений климата между указанными временными интервалами связано с увеличением притока энергии от Солнца. Сильнейшим воздействием, компенсирующим антропогенный парниковый форсинг (т.е. замедляющим потепление климата XX века) являются тропосферные (прежде всего антропогенные) аэрозоли. Их вклад в изменение климата равен –11% на глобальном уровне. Пространственные особенности изменений температуры в целом подобны между различными типами воздействий, но с масштабированием отклика относительно среднеглобального изменения.

Кроме того, с МЗС ИФА РАН ранее были проведены оценки влияния естественных воздействий (изменения солнечной постоянной и вулканическая активности) на изменения кли-

мата в XXI в. Сценарии вариаций характеристик этих воздействий при этом были построены с использованием статистических моделей [Мохов и др., 2006б, 2008]. При этом было получено, что вклад этих воздействий в XXI в. пренебрежимо мал по сравнению с вкладом антропогенных воздействий. Эти результаты согласуются с [Jones et al., 2013; Sedlacek et al., 2023].

В проекте CMIP6 с использованием статистической модели построены сценарии изменения солнечной постоянной в XXI–XXII вв. [Matthes et al., 2017]. При этом, наряду со сценарием ref, для которого эта модель настраивалась по данным спутниковой эры, характеризующихся вековым максимумом солнечной активности, построен и сценарий ext, в котором учитывались прошлые вековые минимумы солнечной активности (по прокси-данным), а также его варианты ext-PMIP4, ext-¹⁰Be и ext-¹⁴C, в которых используются меньшие массивы таких прокси-данных. Сценарий ext-PMIP4 характеризуется развитием векового минимума солнечной активности в середине XXII в., сценарий ext-¹⁴C – увеличенной примерно вдвое амплитудой 11-летнего солнечного цикла, тогда как сценарии ext и ext-¹⁰Be не отличаются от сценария ref принципиальным образом.

В данной работе были проведены расчеты с такими сценариями изменения при задании

разных сценариев антропогенного воздействия на климат семейства SSP. Наиболее значимо от расчетов при сценарии ref отличаются расчёты при сценарии ext-PMIP4 (рис. 9а). Различие оцененной приповерхностной температуры при этом сценарии от соответствующих оценок при сценарии ref мало зависит от сценария антропогенного воздействия и во второй половине XX в. достигает 0.4°C . С этими результатами хорошо согласуются результаты, полученные в [Feulner, Rahmstorf, 2010; Arsenovic et al., 2018], в которых, использовались другие сценарии антропогенного воздействия, а межвековой минимум солнечной активности был искусственно задан в XXI в. Следует отметить, что эффект выбора сценария изменения солнечной постоянной значим для сценария SSP1-2.6 с относительно малыми антропогенными эмиссиями парниковых газов в атмосферу и малозначим для сценария SSP5-8.5 с сильным ростом таких эмиссий.

Различие среднегодовой температуры между сценариями изменения солнечной постоянной ref и ext-PMIP4 во второй половине XXII века наиболее значимо в средних (особенно над сушей) и высоких широтах Северного и Южного полушария. В частности, оно превышает 1°C в Арктике. Подобные различия приповерхностной температуры между двумя сценариями отмечены и для отдельных сезонов. Отмеченные результаты подтверждаются результатами, полученными в [Feulner, Rahmstorf, 2010; Arsenovic et al., 2018].

4. ДРУГИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С МЗС ИФА РАН

4.1. Моделирование многолетнемерзлых грунтов

Площадь распространения приповерхностного многолетнемерзлого грунта (ПММГ) S_p в модели в XX–начале XXI вв. составляет 16–22 млн km^2 [Аржанов и др., 2008; Елисеев и др., 2009; Аржанов и др., 2010; Аржанов и др., 2013], что согласуется с современными эмпирическими оценками (рис. 10а). В расчетах при сценариях SSP (см. раздел 3.3) к 2100 г. потепление климата приводит к сокращению этой площади до 5–15 млн km^2 в зависимости от сценария. В XXI в. при всех сценариях происходит полная деградация ПММГ в Европе (включая европейскую часть России), а в Сибири и в Северной Америке глубина сезонного протаивания увеличивается на несколько десятков сантиметров (рис. 10б–г). Это находится в пределах интервала, полученного для других климатических моделей при сценариях семейства RCP [Koven et al., 2013]. При сценарии SSP1-2.6 минимальное значение S_p , равное 14 млн km^2 , достигается к концу XXI в., а затем увеличивается, достигая 18 млн km^2 к концу XXII столетия. При сценарии SSP2-4.5 в начале XXII в. площадь распространения ПММГ стабилизируется на значении 9 млн km^2 , тогда как при сценарии SSP5-8.5 к середине XXII в. приповерхностные многолетнемерзлые почвогрунты деградируют практи-

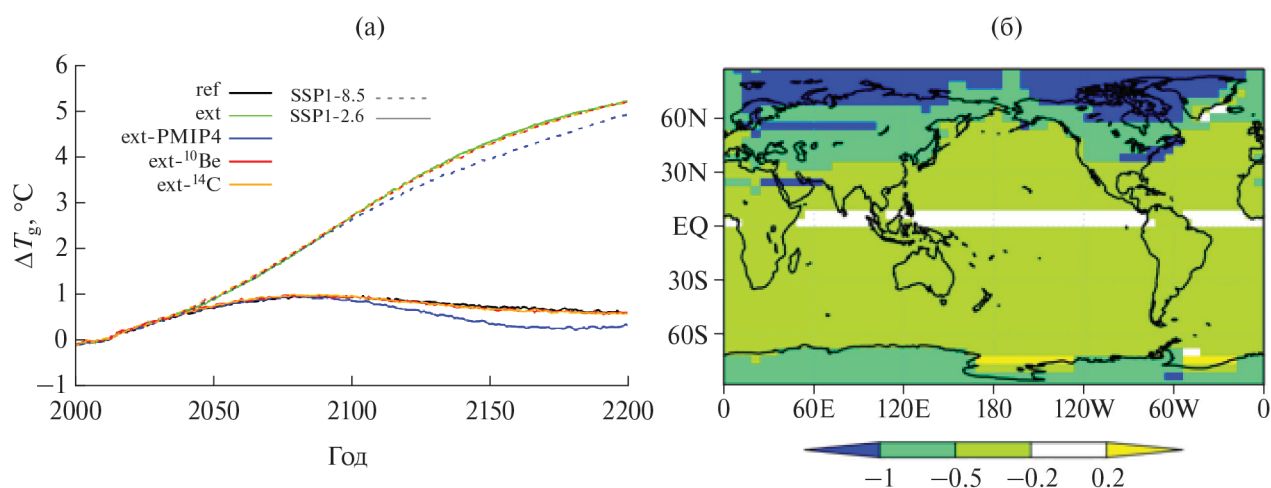


Рис. 9. Изменение глобальной среднегодовой приповерхностной температуры атмосферы в численных экспериментах при сценариях семейства SSP и различных сценариях изменения солнечной постоянной, доступных в проекте CMIP6 (а), а также разность (между сценариями изменения солнечной постоянной ext-PMIP4 и ref) для значений среднегодовой приповерхностной температуры, осреднённой для 2050–2060 гг., при сценарии SSP1-2.6 (б)

чески полностью. Во всех случаях отклик площади распространения ПММГ запаздывает относительно изменений глобальной температуры на несколько десятилетий.

Чувствительность S_p к изменению температуры на единичное среднеглобальное потепление климата близка к $-(4-6)$ млн км²/°С в зависимости от сценария SSP. Это в целом согласуется с соответствующими оценками для моделей ансамблей CMIP5 $-(3-5)$ млн км²/°С [Koven et al., 2013; Chadburn et al., 2017]) и CMIP6 $-(0-4)$ млн км²/°С [Burke et al., 2020]).

Кроме того, с МЗС ИФА РАН были проведены численные эксперименты, в которых сценарии семейства RCP были продолжены идеализированными сценариями снижения концентрации парниковых газов в атмосфере [Елисеев и др.,

2012; Eliseev et al., 2014b]. При этом показана возможность гистерезиса для зависимости S_p от T_g . В некотором интервале значений T_g (зависящем от сценария внешнего воздействия) при заданном значении этой температуры S_p оказывается больше в случае потепления климата, чем в случае его похолодания. Это связано с тем, что состояние почвогрунта в регионах внетропических болот и вблизи границы современного распространения ПВМ зависит от направления внешнего воздействия на климат. Таким образом, в терминах T_g деградация ПММГ при потеплении климата оказывается более быстрой, чем восстановление ПММГ при последующем восстановлении доиндустриального состояния. При этом выявлено, что гистерезис площади распространения приповерхностного много-

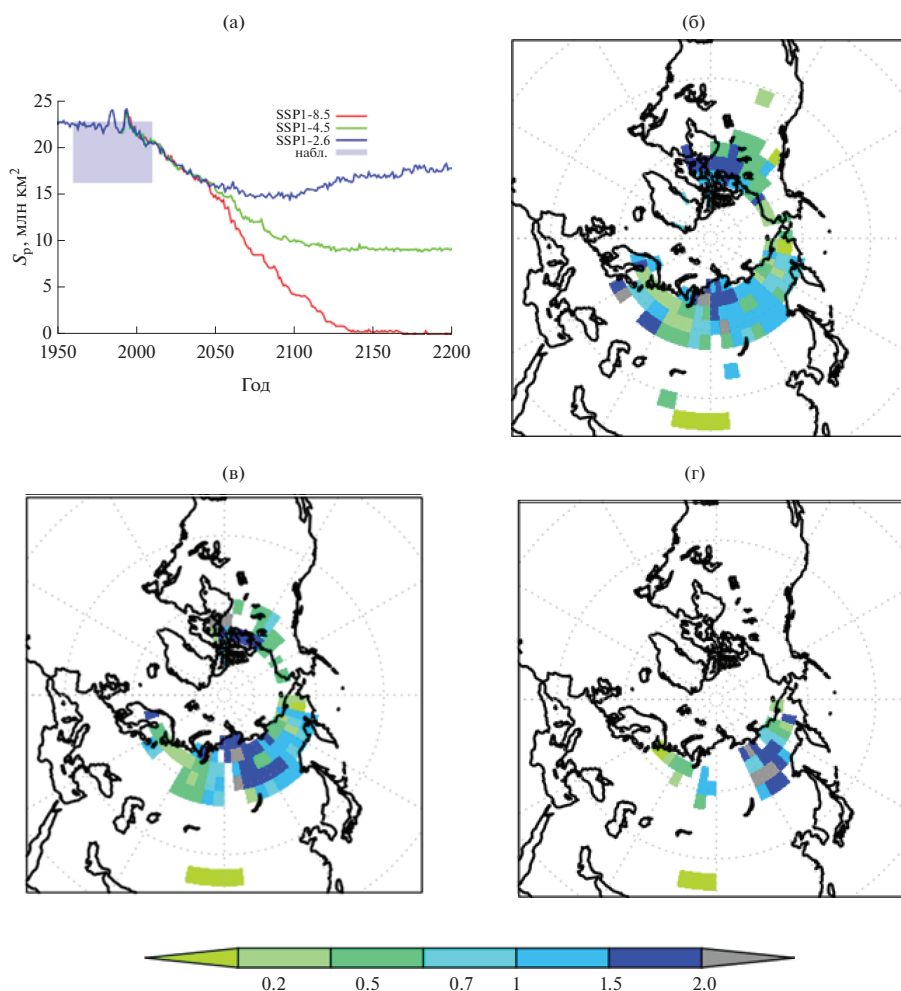


Рис. 10. Площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов по расчетам с МЗС ИФА РАН в сравнении с интервалом эмпирических оценок [Zhang et al., 2008; Tarnocai et al., 2009] (а), а также глубина слоя сезонного протаивания в регионах распространения такого грунта, осредненная для 2000–2015 гг. (б) и для 2090–2100 гг. при сценариях SSP1-2.6 и SSP1-8.5 (в и г соответственно)

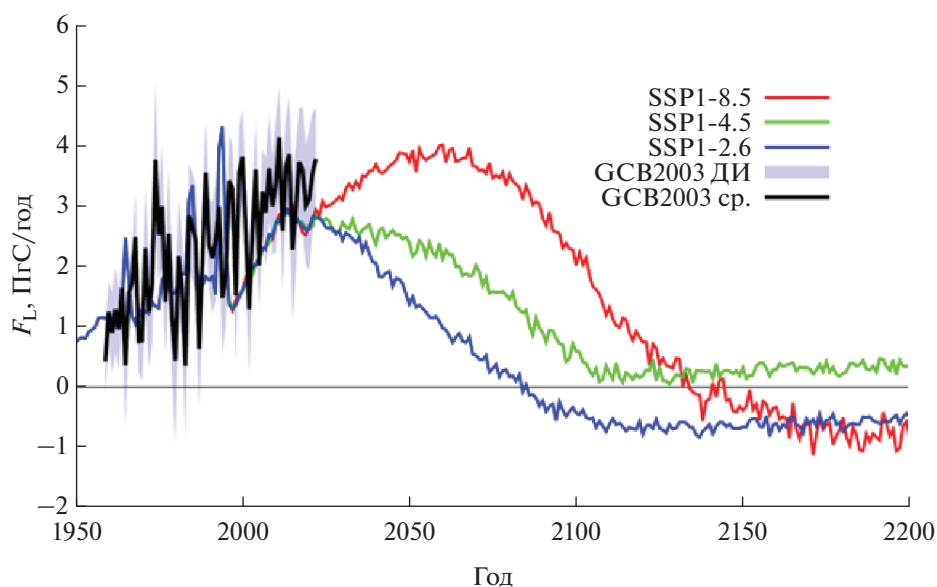


Рис. 11. Глобальная интенсивность поглощения CO_2 из атмосферы наземными экосистемами в численных экспериментах с МЗС ИФА РАН при сценариях SSP в сравнении с оценками проекта GCB2023

летнемёрзлого грунта проявляется в регионах распространения торфяников и связан с инерционностью их отклика на изменение температуры атмосферы. Как следствие, учет влияния торфа на термофизические параметры почвы является особенностью модели, принципиальной для воспроизведения гистерезиса ПММГ.

4.2. Моделирование углеродного и метанового циклов

Наличие в МЗС ИФА РАН блока углеродного цикла позволяет оценивать изменения характеристик обмена углекислым газом между атмосферой и естественными резервуарами — океаном и наземными экосистемами.

В частности, в экспериментах, поставленных в соответствии с условиями проекта CMIP6 (разделы 3.1, 3.3) модель реалистично воспроизводит междесятилетние изменения интенсивности обмена между атмосферой и наземными экосистемами (рис. 11) и океана (не показано) в последние несколько десятилетий по сравнению с данными проекта GCB2023 (Global Carbon Project 2023) [Friedlingstein et al., 2023].

В XXI в. при всех сценариях SSP интенсивность обмена между атмосферой и наземными экосистемами F_L уменьшается (рис. 11). При этом если при сценарии SSP2-4.5 эта интенсивность стабилизируется в начале XXII века на значении около 0.3 ПгС/год, то при сценариях SSP1-2.6 (с активным переходом к «зеленым» технологи-

ям уже в ближайшие десятилетия) и SSP5-8.5 (с интенсивным производством энергии за счёт сжигания ископаемого топлива) интенсивность этого потока переходит через ноль (в конце XXI и в середине XXII в. соответственно) и становится отрицательной, стабилизируясь в конце XXII в. на значениях -0.6 ПгС/год и -0.8 ПгС/год соответственно. Таким образом, при этих двух сценариях в XXII в. наземные экосистемы начинают выделять CO_2 в атмосферу, а не поглощать его (даже без учета эмиссий диоксида углерода в атмосферу из-за землепользования). Для обоих сценариев переход обусловлен интенсификацией разложения органики почвы при потеплении. Однако для сценария SSP1-2.6 дополнительно играет роль ослабление эффекта фертилизации наземной растительности при возвращении $q\text{CO}_2$ к доиндустриальному значению (рис. 6а). Взаимная компенсация эффектов фертилизации и влияния изменений климата на обмен CO_2 между атмосферой и наземными экосистемами приводит к стабилизации F_L на небольшом положительном значении. Важным также является то, что современная интенсивность F_L утрачивается во второй половине XXI в. в расчетах при большинстве сценариев SSP.

Следует отметить, что подобная смена знака в расчетах с МЗС ИФА РАН отмечается также и отдельно для территории России [Денисов и др., 2019] и других крупных стран [Денисов и др.,

2022]. Кроме того, эта смена знака на глобальном уровне и на уровне крупных стран проявляется в моделях ансамбля CMIP6 [Climate Change, 2013, 2021; Денисов и др., 2024].

Наличие блока торфяных пожаров в МЗС ИФА РАН позволяет проанализировать роль пожаров этого типа в глобальном углеродном цикле. При этом получено, что, хотя общий вклад торфяных пожаров в общие глобальные эмиссии CO_2 в атмосферу из-за природных пожаров E_f мал, они играют значительную роль в межгодовой изменчивости E_f [Елисеев и др., 2014].

Кроме того, в расчетах с МЗС ИФА РАН был выявлен гистерезис характеристик углеродного цикла при немонокотонных антропогенных эмиссиях CO_2 в атмосферу [Елисеев, Гизатуллин, 2024]. Он связан с конечностью времени отклика характеристик климата и углеродного цикла на внешние воздействия.

Наряду с углеродным циклом, в МЗС ИФА РАН реализован интерактивный цикл метана, учитывающий отклик на климатические изменения эмиссий метана из переувлажненных экосистем в атмосферу. Наиболее важным результатом этих расчетов является выявление интенсификации эмиссии болотных экосистем при потеплении климата [Елисеев и др., 2008а; Денисов и др., 2013] с существенным увеличением накопления CH_4 в атмосфере. Однако развивающееся при этом дополнительное радиационное возмущающее воздействие и, следовательно, климатический отклик невелики. Это делает обратную связь между климатом и метановым циклом односторонней — значимую роль играет только влияние изменений климата на глобальный цикл метана, а не обратное ему.

4.3. Анализ причинно-следственных связей в Земной климатической системе

Анализ причинно-следственных связей в Земной климатической системе — один из наиболее важных результатов, полученных с МЗС ИФА РАН.

В частности, ранее было отмечено, что для ряда данных $q\text{CO}_2$ отстает (а не опережает) температуру. Это запаздывание составляет несколько сот лет по данным ледовых кернов, характеризующих несколько последних ледниковых циклов плейстоцена [Monnin et al., 2001; Caillon et al., 2003; Мохов и др., 2005а; Bereiter

et al., 2012], и несколько десятков лет для данных, характеризующих последнее тысячелетие (включая малый ледниковый период) [Sheffer et al., 2006; Cox, Jones, 2008] (см. также обзор в [Muryshev et al., 2017]). Такое запаздывание часто используется в качестве аргумента против принципиальной роли антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу в развитии глобального потепления начала XX–XXI вв.

Однако в расчетах с МЗС ИФА РАН было показано, что такое запаздывание не может служить в качестве подобного аргумента. В частности, было показано, что даже знак такого запаздывания может меняться в зависимости от типа внешнего воздействия (например, при наличии или отсутствии антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу) и от его временного масштаба. Например, в расчетах, подобных проведенным в разделах 3.1 и 3.2, можно выделить временные интервалы без значимых антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу, но с наличием сильного вулканического воздействия (первая половина XIX в., рис. 12а) и с существенными (но немонотонными во времени) эмиссиями диоксида углерода в атмосферу (XXI в., рис. 12б). Если в первом случае $q\text{CO}_2$ запаздывает относительно T_g , то во втором, наоборот, опережает глобальную температуру. Более систематически это проанализировано в [Muryshev et al., 2017]. При этом можно выделить ряд механизмов, приводящих к взаимному запаздыванию между $q\text{CO}_2$ и T_g и связанным с временными масштабами отклика ЗКС на внешнее воздействие того или иного типа [Muryshev et al., 2017; Мурышев и др., 2017], взаимное влияние одновременных антропогенных эмиссий различных парниковых газов в атмосферу [Мурышев и др., 2018] и нелинейные процессы в ЗКС [Мурышев и др., 2021]. Следует отметить, что различие между знаками взаимного запаздывания между концентрацией CO_2 в атмосфере и глобальной температурой в зависимости от выбора временного интервала также проявляется в моделях общей циркуляции проекта CMIP6 [Мурышев и др., 2024].

Таким образом, указанное взаимное запаздывание между концентрацией CO_2 в атмосфере и глобальной температурой не может быть использовано для вывода о причинно-следственных связях в Земной климатической системе. Следовательно, оно не противоречит основному вкладу антропогенных парниковых

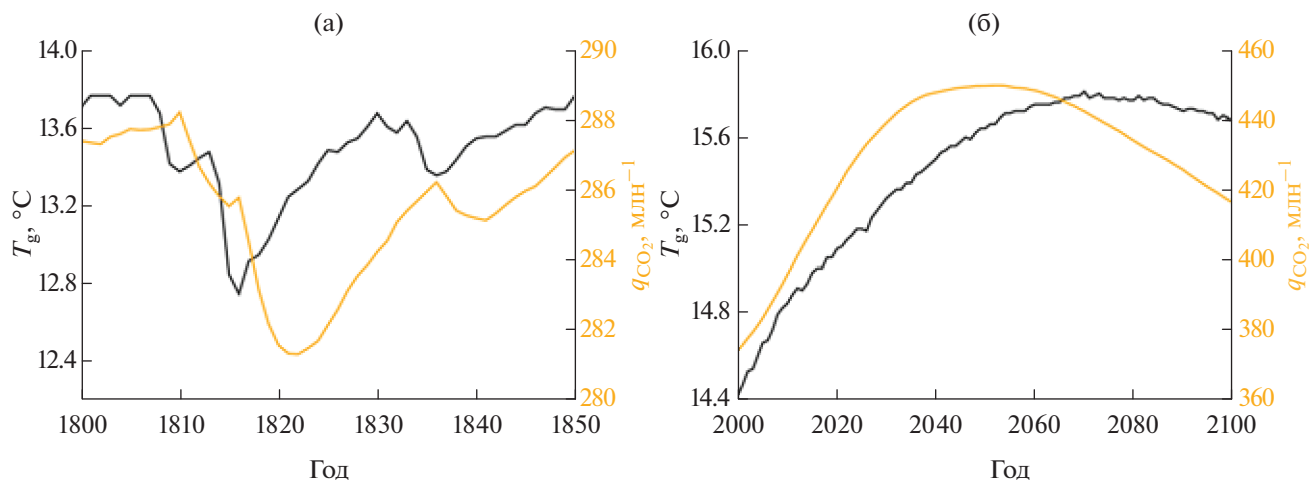


Рис. 12. Изменение глобальной температуры T_g и концентрации CO_2 в атмосфере q_{CO_2} в расчетах с МЗС ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом в первой половине XIX в. (а) и в XXI в. (б)

газов в изменения климата последних нескольких десятилетий.

5. ВЫВОДЫ

Представленные результаты свидетельствуют, что МЗС ИФА РАН может быть использована для широкого круга задач, связанных с анализом отклика Земной климатической системы на внешние воздействия на временных масштабах от десятилетий до тысяч и более лет.

Среди основных результатов, полученных с моделью, было выявлено следующее:

- даже если на глобальном уровне современный климат теплее климата середины голоцена, то современные температурные режимы для отдельных регионов могут не достигать еще уровня максимального потепления в оптимум голоцена;
- анализ вклада основных климатических воздействий в изменения климата индустриального периода;
- эффект гистерезиса площади распространения приповерхностного многолетнемерзлого грунта в зависимости от изменения глобальной температуры;
- утрата наземными экосистемами способности поглощать CO_2 из атмосферы при продолжении современного потепления климата;
- интенсификация эмиссии болотных экосистем при потеплении климата с существенным увеличением накопления CH_4 в атмосфере, но слабым влиянием на модификацию

изменений климата (обратная связь между климатом и метановым циклом становится односторонней);

- знак взаимного запаздывания между концентрацией CO_2 в атмосфере и глобальной температурой может меняться в зависимости от типа внешнего воздействия и от его временного масштаба. Таким образом, оно не противоречит основному вкладу антропогенных парниковых газов в изменения климата последних нескольких десятилетий.

В настоящее время проводится дальнейшее развитие МЗС ИФА РАН с целью расширения круга задач, которые могут быть решены с ее использованием. В частности, в ближайшее время в модель планируется внедрить цикл серы в атмосфере [Eliseev et al., 2021] и модуль вычисления динамики ледовых щитов [Плосков и др., 2023].

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы благодарят коллег, которые принимали участие в разработке модели, постановке и анализе численных экспериментов. Отметим ключевой вклад В.К. Петухова в создание первоначальных версий модели. Авторы выражают особую благодарность Г.С. Голицыну, который на протяжении многих лет содействовал развитию модели. Существенная часть важнейших результатов, полученных впервые с МЗС ИФА РАН, была опубликована в журнале «Известия РАН. Физика атмосферы и океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др. Воспроизведение характеристик температурного и гидрологического режимов почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 591–610.
- Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 3. С. 37–42.
- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Клименко В.В. и др. Оценки климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 6. С. 643–654.
- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI веке по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С. 31–42.
- Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 19–26.
- 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. 2023. Т. 56. № 3. С. 255–266.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 30–41.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады РАН. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественные и антропогенные эмиссии CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Естественные стоки и источники CO_2 и CH_4 в атмосфере российских регионов и их вклад в изменения климата в XXI веке по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 2. С. 157–171.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана в атмосферу влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 543–549.
- Елисеев А.В. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
- Елисеев А.В. Предотвращение изменений климата за счет эмиссии сульфатов в стратосферу: влияние на глобальный углеродный цикл и наземную биосферу // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 467–474.
- Елисеев А.В. Влияние соединений серы в тропосфере на наземный углеродный цикл // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 673–683.
- Елисеев А.В. Иерархия моделей Земной климатической системы // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2024. Т. LXVII. № 7. С. 545–561.
- Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 291–304.
- Елисеев А.В., Гизатуллин Р.Д. Гистерезисный отклик наземного углеродного цикла на антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 3. С. 295–307.
- Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Аржанов М.М., Мохов И.И. Гистерезис зависимости площади приповерхностной вечной мерзлоты от глобальной температуры // Доклады РАН. 2012. Т. 444. № 4. С. 444–447.
- Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние вулканической активности на изменение климата последних нескольких веков: оценки с климатической моделью промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 723–746.
- Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние учета радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI–XXI веков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 18–34.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008а. Т. 44. № 2. Р. 147–162.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Вариации климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели

- промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007а. Т. 43. № 1. С. 3–17.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Влияние учета прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007б. Т. 43. № 5. С. 591–601.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO₂ в атмосферу // Доклады РАН. 2014. Т. 459. № 4. С. 496–500.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 3–14.
- Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады РАН. 2019а. Т. 485. № 1. С. 76–82.
- Елисеев А.В., Сергеев Д.Е. Влияние подсечочной неоднородности растительности на расчёты характеристик углеродного цикла // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 259–270.
- Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д. и др. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019б. Т. 55. № 1. С. 41–53.
- Математическое моделирование Земной системы / ред. Яковлев Н.Г. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
- Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / Ред. Бондур В.Г., Мохов И.И., Макоско А.А. М.: Российская академия наук, 2022. 388 с.
- Мохов И.И. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке в сопоставлении с климатическими изменениями в прошлом и настоящем / Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий: проблема Киотского протокола: материалы Совета-семинара при Президенте РАН. М.: Наука. 2006. С. 75–93.
- Мохов И.И. Диагноз и моделирование глобальных и региональных климатических изменений с определением влияния естественных и антропогенных факторов / Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. VI. Изменения климата: Влияние внеземных и земных факторов. М.: ИФА РАН, 2008. С. 37–51.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным наблюдений и реконструкций для XVII–XX веков и по модельным расчетам // Доклады РАН. 2006а. Т. 409. № 1. С. 115–119.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности // Доклады РАН. 2006б. Т. 411. № 2. С. 250–253.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке при различных сценариях солнечной и вулканической активности и антропогенных воздействий // Космические исследования. 2008а. Т. 46. № 4. С. 363–367.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Солнечная активность и оценки ее влияния на глобальную температуру / В: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. VIII. Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце – Земля. М.: ИГ РАН. 2008б. С. 143–148.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов и температурного режима атмосферы по палеореконструкциям для антарктической станции Восток // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005а. Т. 41. № 5. С. 579–592.
- Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
- Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады РАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Аржанов М.М. и др. Моделирование изменений климата в высоких широтах с использованием климатической модели ИФА РАН / В: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. III. Ч. II. Природные процессы в полярных областях Земли. М.: ИГ РАН. 2008в. С. 13–19.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.

- Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады РАН. 2005б. Т. 402. № 2. С. 243–247.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Денисов С.Н. Модельная диагностика изменений эмиссии метана болотными экосистемами во второй половине XX века с использованием данных реанализа // Доклады РАН. 2007. Т. 417. № 2. С. 258–262
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады РАН. 2006в. Т. 407. № 3. С. 400–404.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.В. Взаимодействие климата и углеродного цикла в 20–21 вв. по расчетам с глобальной климатической моделью // Вычислительные технологии. 2006г. Т. 11. Ч. 2. С. 156–165.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Хандорф Д. и др. Северо-Атлантическое Колебание: диагноз и моделирование декадной изменчивости и ее долгопериодной эволюции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 605–616.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Елисеев А.В. и др. Изменения климата и их последствия в высоких широтах: диагностика и моделирование / В: Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen. 2011. С. 96–130.
- Мохов И.И., Семенов 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. Т. 39. № 2. С. 150–165.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Модельные сценарии изменений стока сибирских рек в XXI веке // Доклады АН. 2002а. Т. 383. № 5. С. 684–687.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные оценки изменений в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2002б. № 8. С. 77–93.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н. и др. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 55. № 3. С. 11–19.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И. и др. Влияние нелинейных процессов на временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 62–68.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И. и др. Фазовый сдвиг между глобальной приповерхностной температурой и содержанием CO_2 в атмосфере по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 516. № 2. С. 632–639.
- Мурышев К.Е., Тимажеев А.В., Дембицкая М.В. Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при непарниковом внешнем воздействии на климатическую систему // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 3. С. 84–102.
- Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В., Мирсаева Н.А. Теория климата. М.: КНОРУС. 2024. 192 с.
- Петухов В.К. Зональная климатическая модель тепло- и влагообмена в атмосфере над океаном // Физика атмосферы и проблема климата / Голицын Г.С., Яглом А.М. (ред.). М.: Наука. 1980. С. 8–41.
- Плюсков А.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Ансамблевое моделирование динамики ледовых щитов в последнем ледниковом цикле // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 99–105.
- Abe-Ouchi A., Saito F., Kawamura K. et al. Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume // Nature. 2013. V. 500. № 7461. P. 190–193.
- Arsenovic P., Rozanov E., Anet J. et al. Implications of potential future grand solar minimum for ozone layer and climate // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 5. P. 3469–3483e.
- Bereiter B., Lüthi D., Siegrista M. et al. Mode change of millennial CO_2 variability during the last glacial cycle associated with a bipolar marine carbon seesaw // Proc. Nat. Acad. Sci. 2012. V. 109. № 25. P. 9755–9760.
- Berger A.L. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. № 12. P. 2362–2367.
- Blunier T., Chappellaz J.A., Schwander J. et al. Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene epoch // Nature. 1995. V. 374. № 6517. P. 46–49.
- Brovkin V., Claussen M., Driesschaert E. et al. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity // Clim. Dyn. 2006. V. 26. № 6. P. 587–600.
- Burke E.J., Zhang Y., Krinner G. Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change // The Cryosphere. 2020. V. 14. № 9. P. 3155–3174.
- Caillon N., Severinghaus J., Jouzel J. et al. Timing of atmospheric CO_2 and Antarctic temperature changes across Termination III // Science. 2003. V. 299. № 5613. P. 1728–1731.

- Chadburn S., Burke E., Cox P. et al.* An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming // *Nature Clim Change*. 2017. V. 7. № 5. P. 340–344.
- Claussen M., Mysak L., Weaver A. et al.* Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models // *Clim. Dyn.* 2002. V. 18. № 7. P. 579–586.
- Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change / eds: Houghton J.T., Callander B.A., Varney S.K.. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 198 p.
- Climate Change: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change / eds: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., et al. Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.
- Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., et al. Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. / eds: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2021. 2391 p.
- Cox P., Jones C.* Illuminating the modern dance of climate and CO₂ // *Science*. 2008. V. 321. № 5896. P. 1642–1644.
- Eby M., Weaver A.J., Alexander K. et al.* Historical and idealized climate model experiments: an EMIC intercomparison // *Clim. Past*. 2013. V. 9. № 3. P. 1111–1140.
- Eliseev A.V., Coumou D., Chernokulsky A.V. et al.* Scheme for calculation of multi-layer cloudiness and precipitation for climate models of intermediate complexity // *Geosci. Model Devel.* 2013. V. 6. № 5. P. 1745–1765.
- Eliseev A.V., Demchenko P.F., Arzhanov M.M., Mokhov I.I.* Transient hysteresis of near-surface permafrost response to external forcing // *Clim. Dyn.* 2014b. V. 42. № 5–6. P. 1203–1215.
- Eliseev A.V., Gizatullin R.D., Timazhev A.V.* ChAP 1.0: A stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // *Geosci. Mod. Devel.* 2021. T. 14. № 12. P. 7725–7747.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Amplitude-phase characteristics of the annual cycle of surface air temperature in the Northern Hemisphere // *Adv. Atmos. Sci.* 2003. V. 20. № 1. P. 1–16.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Carbon cycle-climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // *Theor. Appl. Climatol.* 2007. V. 89. № 1–2. P. 9–24.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Eventual saturation of the climate-carbon cycle feedback studied with a conceptual model // *Ecol. Model.* 2008. V. 213. № 1. P. 127–132.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // *Adv. Atmos. Sci.* 2011. V. 28. № 5. P. 1215–1232.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V.* An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. № 12. C. 3205–3223.
- Eliseev A.V., Mokhov I.I., Rubinstein K.G., Guseva M.S.* Atmospheric and coupled model intercomparison in terms of amplitude-phase characteristics of surface air temperature annual cycle // *Adv. Atmos. Sci.* 2004. V. 21. № 6. P. 837–847.
- Erb M.P., McKay N.P., Steiger N. et al.* Reconstructing Holocene temperatures in time and space using paleoclimate data assimilation // *Clim. Past*. 2022. V. 18. № 12. P. 2599–2629.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Mod. Dev.* 2016. V. 9. № 5. P. 1937–1958.
- Feulner G., Rahmstorf S.* On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. № 5. L05707.
- Flückiger J., Monnin E., Stauffer B. et al.* High resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂ // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2002. V. 16. № 1. GB001417.
- Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al.* Global Carbon Budget 2023 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2023. V. 15. № 12. P. 5301–5369.
- Gao C., Robock A., Ammann C.* Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models // *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 2008. V. 113. № D23. D23111.
- Gidden M.J., Riahi K., Smith S.J. et al.* Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century // *Geosci. Mod. Devel.* 2019. V. 12. № 4. P. 1443–1475.
- Handorf D., Petoukhov V.K., Dethloff K. et al.* Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D22. P. 27253–27275.
- Huffman G.J., Adler R.F., Behrangi A. et al.* The New Version 3.2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly and Daily Precipitation Products // *J. Climate*. 2023. V. 36. № 21. P. 7635–7655.

- Jones G.S., Lockwood M., Stott P.A.* What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near-surface temperature changes? // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. V. 117. № D5. D05103.
- Kaufman D.S., Broadman E.* Revisiting the Holocene global temperature conundrum // *Nature*. 2023. V. 614. № 7948. P. 425–435.
- Kaufman D., McKay N., Routson C. et al.* Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach // *Sci. Data*. 2020. V. 7. P. 201.
- Klein Goldewijk K., Beusen A., Doelman J., Stehfest E.* Anthropogenic land use estimates for the Holocene – HYDE 3.2 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9. № 2. P. 927–953.
- Kloster S., Lasslop G.* Historical and future fire occurrence (1850 to 2100) simulated in CMIP5 Earth System Models // *Glob. Planet. Change*. 2017. V. 150. P. 58–69.
- Koven C.D., Riley W.J., Stern A.* Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth system models // *J. Climate*. 2013. V. 26. № 6. P. 1877–1900.
- Lamarque J.-F., Bond T.C., Eyring V. et al.* Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application // *Atmos. Chem. Phys*. 2010. V. 10. № 15. P. 7017–7039.
- Le Quèrè C., Andrew R.M., Friedlingstein P. et al.* Global carbon budget 2018 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. № 4. P. 2141–2194.
- Lean J.L., Rind D.H.* How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 18. L18701.
- Liu Z., Mehran A., Phillips T.J., AghaKouchak A.* Seasonal and regional biases in CMIP5 precipitation simulations // *Clim. Res.* 2014. V. 60. № 1. P. 35–50.
- Lüthi 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.
- MacDougall A.H., Frölicher T.L., Jones C.D. et al.* Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂ // *Biogeosciences*. 2020. V. 17. № 11. P. 2987–3016.
- Marsicek J., Shuman B.N., Bartlein P.J. et al.* Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures // *Nature*. 2018. V. 554. № 7690. P. 92–96.
- Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C.* A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years // *Science*. V. 339. № 6124. P. 1198–1201.
- Matthes K., Funke B., Andersson M.E. et al.* Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // *Geosci. Model Dev*. 2017. V. 10. № 6. P. 2247–2302.
- Meinshausen M., Vogel E., Nauels A. et al.* Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6) // *Geosci. Model Dev*. 2017. V. 10. № 5. P. 2057–2116.
- McGuffie K., Henderson-Sellers A.* A climate modelling primer. Hoboken: Wiley, 2005. 287 p.
- Meehl G., Senior C., Eyring V. et al.* Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models // *Sci. Adv*. 2020. V. 6. eaba1981.
- Mokhov I.I., Eliseev A.V.* Explaining the eventual transient saturation of climate-carbon cycle feedback // *Carbon Balance and Management*. 2008. V. 3. № 4.
- Mokhov I.I., Eliseev A.V., Karpenko A.A.* Decadal-to-centennial scale climate-carbon cycle interactions from global climate models simulations forced by anthropogenic emissions / In: "Climate Change Research Trends" (ed. Peretz L.N.). Hauppauge: Nova Sci. Publ., 2008. P. 217–241.
- Monnin E., Indermühle A., Dällenbach A. et al.* Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination // *Science*. 2001. V. 291. № 5501. P. 112–114.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A. et al.* An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2021. V. 126. № 3. e2019JD032361.
- Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I. et al.* Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing // *Glob. Planet. Change*. 2017. T. 148. P. 29–41.
- Osman M.B., Tierney J.E., Zhu J. et al.* Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum // *Nature*. 2021. V. 599. № 7884. P. 239–244.
- PAGES 2k Consortium.* Continental-scale temperature variability during the past two millennia // *Nature Geosci.* 2013. V. 6. № 5. P. 339–346.
- Petoukhov V., Claussen M., Berger A. et al.* EMIC intercomparison project (EMIP-CO2): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO₂ doubling // *Clim. Dyn.* 2005. V. 25. № 4. P. 363–385.
- Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A.* The IAP RAS global climate model. Moscow: Dialogue-MSU, 1998. 110 p.
- Price C., Rind D.* A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 1992. V. 97. № D9. P. 9919–9933.
- Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R. et al.* Global burned area and biomass burning emissions from small fires // *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*. 2012. V. 117. № G4. G04012.
- Scheffer M., Brovkin V., Cox P.M.* Positive feedback between global warming and atmospheric CO₂ concentration in-

- ferred from past climate change // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № 10. L10702.
- Schurer A.P., Tett S.F.B., Hegerl G.C. Small influence of solar variability on climate over the past millennium // *Nature Geosci.* 2014. V. 7. № 2. P. 104–108.
- Sedlacek J., Sukhodolov T., Egorova T. et al. Future climate under CMIP6 solar activity scenarios // *Earth and Space Science.* 2023. V. 10. № 7. e2022EA002783.
- Solanki S.K., Krivova N.A., Haigh J.D. Solar irradiance variability and climate // *Ann. Rev. Astronomy Astrophys.* 2013. V. 51. № 311–351.
- Sowers T., Alley R.B., Jubenville J. Ice core records of atmospheric N₂O covering the last 106,000 years // *Science.* 2003. V. 301. № 5635. P. 945–948.
- Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 19. L19704.
- Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles.* 2009. V. 23. № 2. GB2023.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93. № 4. P. 485–498.
- Texier, D., de Noblet, N., Harrison, S.P. et al. Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedbacks in climate change: coupled model simulations for 6000 years BP and comparison with palaeodata for northern Eurasia and northern Africa // *Clim. Dyn.* 1997. V. 13. № 12. P. 865–882.
- van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. et al. The Representative Concentration Pathways: an overview // *Clim. Change.* 2011. V. 109. № 1–2. P. 5–31.
- Wanner H., Beer J., Bütikofer J. et al. Mid- to Late Holocene climate change: An overview // *Quaternary Sci. Rev.* 2008. V. 27. № 19–20. P. 1791–1828.
- Weber S.L. The utility of Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs) // *Wiley Intern. Rev. Clim. Change.* 2010. V. 1. № 2. P. 243–252.
- Zhang T., Barry R.G., Knowles K. et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // *Polar Geography.* 2008. V. 31. № 1–2. P. 47–68.
- Zhou J., Tung K.-K. Solar cycles in 150 years of global sea surface temperature data // *J. Climate.* 2010. V. 3. № 12. P. 3234–3248.
- Zickfeld K., Eby M., Weaver A.J. et al. Long-term climate change commitment and reversibility: An EMIC intercomparison // *J. Climate.* 2013. V. 26. № 16. P. 5782–5809.

THE OBUKHOV INSTITUTE OF ATMOSPHERIC PHYSICS RAS EARTH SYSTEM MODEL: ITS STRUCTURE AND MAJOR RESULTS

© 2025 A. V. Eliseev^{1,2,*}, I. I. Mokhov^{1,2}, M. M. Arzhanov¹, S. N. Denisov¹,
A. V. Chernokulsky¹, K. E. Murysheva^{1,2}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: eliseev@ifaran.ru

The Earth system model of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS ESM) includes blocks describing the state of the atmosphere, ocean, active layer of land, biogeochemical cycles, processes related to atmospheric electricity and atmospheric chemistry. It belongs to the class of Earth system models of intermediate complexity (EMICs) and participates in relevant international comparison projects. A special feature of the model is the parameterization of synoptic variability in the atmosphere and ocean, which allows accelerating simulations by two orders of magnitude. The model realistically reproduces climate changes over the period of instrumental measurements and can be used for assessments of past and future climate changes on time scales from decades to millennia. With the IAP RAS ESM, the a number of important results related to identifying the causes of climate change in different epochs, analyzing the influence of biogeochemical cycles on climate change and causal relationships in the Earth's climate system and the comparative role of various external natural and anthropogenic factors.

Keywords: climate changes, EMIC, IAP RAS ESM