

На правах рукописи

Елисеев Алексей Викторович

**ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНЫХ
ЭКОСИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ АНТРОПОГЕННОГО
И ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

25.09.29 — Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико–математических наук

Москва — 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор
Семёнов Сергей Михайлович
доктор физико-математических наук
Володин Евгений Михайлович
доктор физико-математических наук
Рубинштейн Константин Григорьевич

Ведущая организация Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН

Защита состоится «_____» _____ 2011 г. в _____:_____ ч.
на заседании Диссертационного совета Д 002.096.01 в Учреждении Рос-
сийской академии наук Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова
РАН по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 20_____ г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук



Л.Д. Краснокутская

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Климатическая система, наряду с физическими компонентами — атмосферой, океаном, деятельным слоем суши и криосферой, включает в себя и экосистемы. При этом экосистемы являются составной частью каждой из указанных физических компонент климата, оказывая влияние на климатические характеристики на большом спектре пространственных и временных масштабов.

Традиционно взаимодействие климата и экосистем подразделяется на биогеофизические и биогеохимические процессы. Биогеофизическое взаимодействие обусловлено влиянием состояния экосистем на альбедо поверхности, интенсивности турбулентного переноса тепла и влаги между атмосферой и деятельным слоем почвы и высотой шероховатости земной поверхности. В частности, замена лесов умеренного пояса и бореальных лесов на травяную и кустарниковую растительность способствует развитию охлаждающего климатического радиационного возмущающего воздействия (РВВ, в ряде публикаций используется также синонимичный термин "радиационный форсинг"). Биогеохимическое взаимодействие между климатом и экосистемами обусловлено вовлечённостью экосистем в ряд биогеохимических циклов, определяющих, в частности, содержание радиационно-активных примесей в атмосфере, прежде всего CO_2 .

Принципиально важным для взаимодействия климата и экосистем является то, что оно является двунаправленным: как состояние экосистем определяется, в том числе, состоянием климата, так и климатические характеристики зависят от состояния экосистем. Последнее можно проиллюстрировать на примере углекислого газа в атмосфере. Значение концентрации CO_2 в атмосфере q_{CO_2} зависит, в частности, от интенсивности поглощения углекислого газа из атмосферы океаном и наземными экосистемами. Это поглощение определяется, в том числе, состоянием климата, изменяющим продуктивность экосистем, интенсивность почвенного дыхания, а также растворимость углекислого газа в океане. В свою очередь, значение q_{CO_2} определяет парниковое РВВ и, следовательно, климатический отклик. Двунаправленность взаимодействия климата и экосистем позволяет ввести понятие обратной связи между климатом и углеродным циклом и ввести соответствующий параметр обратной связи. В частности, с климатической моделью, в явном виде учитывающей углеродный цикл, можно провести два численных эксперимента. В одном из них (обозначаемом индексом c) используется полная версия модели. Второе интегрирование (обозначаемое индексом u) проводится с версией, в которой не учитывается влияние изменений климата на состояние углеродного цикла. В этом случае параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом определяется в виде

$$f_{\text{CO}_2} = \frac{q_{\text{CO}_2}^c - q_{\text{CO}_2,0}}{q_{\text{CO}_2}^u - q_{\text{CO}_2,0}}, \quad (1)$$

а коэффициент усиления обратной связи между климатом и углеродным циклом — в виде

$$g_{\text{CO}_2} = (f_{\text{CO}_2} - 1) / f_{\text{CO}_2}. \quad (2)$$

Здесь $q_{\text{CO}_2,0}$ — начальное значение q_{CO_2} для двух указанных численных экспериментов. В случае $f_{\text{CO}_2} > 1$ (что эквивалентно $g_{\text{CO}_2} > 0$) обратная связь между климатом и углеродным циклом является положительной, при $f_{\text{CO}_2} < 1$ (или $g_{\text{CO}_2} < 0$) — отрицательной. В первом случае взаимодействие климата и углеродного цикла усиливает накопление углекислого газа в атмосфере и, следовательно, климатический отклик. Во втором, наоборот, в полной модели (с) при одних и тех же антропогенных эмиссиях CO_2 увеличение $q_{\text{CO}_2,0}$ и $T_{a,g}$ оказывается меньшим, чем в модели с односторонней связью (u). Для абсолютного большинства современных климатических моделей с углеродным циклом (например, для моделей проекта C⁴MIP (Coupled Climate–Carbon Cycle Intercomparison Project)) характерна положительность обратной связи между климатом и углеродным циклом.

За последние 150 лет по инструментальным наблюдениям отмечается рост глобальной приповерхностной температуры. Согласно Четвёртому отчёту Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) линейный тренд температуры атмосферы у поверхности при глобальном осреднении за XX век составляет 0.6 ± 0.2 К/столетие. Регионально и по отдельным сезонам потепление может быть ещё более значительным. Так, в большей части Евразии и Северной Америки коэффициент линейного тренда T_a превышает 1.5 К/столетие. Существенные изменения отмечаются не только для температуры, но и для других климатических характеристик, напрямую влияющих на состояние экосистем. В частности, отмечаются статистически значимые изменения количества осадков и частоты их выпадения и влагосодержания почвы. Для России особенно важными представляются тенденции уменьшения увлажнения в основных регионах сельскохозяйственного производства на юге Европейской части и запада Сибири, а также общий рост осадков в северной части страны. Ещё более значимые изменения климата ожидаются в XXI веке. Такие климатические изменения могут способствовать как увеличению, так и уменьшению продуктивности экосистем, а также смещению границ их ареалов.

Взаимодействие климата и экосистем, в принципе, способно заметно изменить климатический отклик на внешние воздействия. Более того, взаимодействия климата и экосистем само может привести к климатическим изменениям. В частности, особенности системы "климат–растительность" в регионе Сахары приводят к наличию мультистабильности климата в этом регионе, что, в свою очередь, могло служить причиной опустынивания Сахары в середине голоцена, известного по данным палеорекоkonструкций. Взаимодействие климата и экосистем может привести к появлению множественных положений равновесия системы. Выделение метана из экосистем могло служить причиной резкого потепления климата 55 млн. лет назад.

Для России, более половины площади которой покрыто лесами, влияние взаимодействия климата и экосистем на состояние климатической системы представляется особенно важным. В частности, российские леса в настоящее время служат значительным стоком антропогенного углерода из атмосферы, способствуя стабилизации климата.

Следует иметь в виду, что количественные характеристики взаимодействия климата и экосистем в настоящее время существенно различаются между разными моделями, что было продемонстрировано, например, в проектах сравнения климатических моделей C⁴MIP и LUCID (Land-Use and Climate, Identification of Robust Impacts). Как следствие, для оценки неопределённости, возникающей из-за недостаточного знания значений управляющих параметров, целесообразна постановка численных экспериментов в ансамблевой форме, которая позволяет проводить оценки будущих изменений характеристик климатической системы не только в терминах "средней" (часто интерпретируемой как "наиболее вероятной") траектории, но и интервала неопределённости (например, доверительного интервала или стандартного отклонения) таких оценок. Более того, неопределённость оценки будущих изменений климата может возникать не только вследствие неопределённости значений управляющих параметров используемой математической модели, но и из-за недостаточной точности знания начальных условий интегрирования, сценариев антропогенного воздействия или структурной неопределённости (связанной с недостаточным знанием структуры определяющих уравнений и расчётных алгоритмов задачи). Таким образом, целесообразна постановка специальных ансамблевых численных экспериментов с климатическими моделями, в которых те или иные параметры моделей варьируются систематическим образом.

Цели работы

1. Разработка иерархии моделей различной сложности, описывающих взаимодействие климата и экосистем на масштабах от десятилетия до нескольких тысячелетий.
2. Физическое описание механизмов взаимодействия климата и экосистем на указанных масштабах.
3. Количественная оценка влияния взаимодействия климата и экосистем на климатические изменения последних нескольких столетий и XXI века.
4. Оценка неопределённости изменений характеристик состояния климата и экосистем в XXI веке, связанная с неопределённостью взаимодействия между ними.

Методы исследования

Основные результаты диссертационной работы были получены с использованием климатической модели (КМ), разработанной и развиваемой в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) при непосредственном участии автора. КМ ИФА РАН — единственная российская модель, относящаяся к классу моделей промежуточной сложности. Она также, наряду с моделью общей циркуляции Института вычислительной математики РАН, является одной из двух российских трёхмерных климатических моделей, включающей в себя блоки атмосферы, океана и углеродного и метанового циклов (см. ниже).

КМ 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 альbedo поверхности, характеристик облачности, водяного пара, озона и тропосферных сульфатных аэрозолей. В блоке переноса длинноволновой радиации учитывается температура и влажность атмосферы, облачность, углекислый газ, метан, закись азота и фреоны. Крупномасштабная динамика атмосферы (с масштабом больше синоптического) описывается явно. Синоптические процессы параметризованы в предположении гауссовости их ансамблей. Последнее позволяет существенно уменьшить время, необходимое для расчётов с моделью. В частности, при использовании единственного ядра процессора Intel Core2 Quad Q9400 необходимое время интегрирования КМ ИФА РАН на один модельный год составляет до 22 с в зависимости от версии модели. Характеристики морского льда в КМ ИФА РАН рассчитываются диагностически в зависимости от приповерхностной температуры атмосферы и температуры поверхности океана. В рамках работы над материалом, включённым в диссертационную работу, КМ ИФА РАН была дополнена блоками углеродного и метанового циклов. В расчётах с моделью, включённых в главы 8–10, использовалась версия КМ ИФА РАН с детальным блоком процессов термо- и гидрофизики почвогрунта с 240 уровнями по вертикали. Горизонтальное разрешение версий КМ ИФА РАН, использованных в диссертационной работе, составляет 4.5° широты и 6° долготы с 8 уровнями по вертикали в атмосфере (вплоть до 80 км) и 3 уровнями в океане.

Хотя современное поколение климатических моделей промежуточной сложности и затруднительно применять на масштабах от нескольких лет до примерно десятилетия, на междекадном масштабе они достаточно реалистично описывают отклик климата на внешние воздействия. Именно междекадный и более длительный масштаб времени характерен для развития антропогенного воздействия в последние столетия и для изменений такого воздействия, ожидаемых в последующие несколько столетий. В частности, несмотря на используемые упрощения, КМ ИФА РАН реалистично воспроизводит доиндустриальное и современное состояние климатической системы, а также общие характеристики климатических изменений последних

нескольких столетий (в том числе — наблюдавшиеся в XX веке). Изменения характеристик состояния климата и экосистем в КМ ИФА РАН при различных сценариях антропогенного воздействия на климат в XXI веке также находятся внутри интервала, получающегося по расчётам с другими современными моделями климата.

Вычислительная дешевизна КМ ИФА РАН позволяет эффективно проводить ансамблевые численные эксперименты с моделью, анализируя зависимость полученных результатов в зависимости от начальных условий, управляющих параметров модели или сценариев внешнего воздействия на систему.

В диссертации при постановке численных экспериментов использовались наиболее современные реконструкции антропогенного воздействия на климат и сценарии будущих климатических изменений. Расчёты главы 2 проводились с идеализированными сценариями антропогенного воздействия на климат с целью большей наглядности полученных результатов.

Особенностью представленной диссертационной работы является широкое использование ансамблевой постановки численных экспериментов с изменением начальных условий интегрирования, сценариев внешнего воздействия на климат и управляющих параметров модели. Следует отметить, что такие численные эксперименты требуют значительных вычислительных затрат. В частности, суммарная длина численных экспериментов с КМ ИФА РАН, анализируемых в работе, равна 698 581 модельных года. Расчёты такой длительности с детальными моделями общей циркуляции весьма затруднительны. Это обуславливает использование климатической модели промежуточной сложности для целей диссертационной работы.

В работе используются методы анализа ансамблевых численных экспериментов. Они основаны либо на диаграммах Тэйлора, либо на байесовой статистике.

В главе 2 физическая интерпретация полученных результатов производится также с использованием боксовой модели, включающей в себя энергобалансовую модель климата и авторскую глобально–осреднённую модель углеродного цикла.

Основные положения выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Разработанная автором пространственно–распределённая модель наземного углеродного цикла, включённая в климатическую модель ИФА РАН.
2. Разработанная автором глобально–осреднённая модель углеродного цикла, включённая в климатическую модель ИФА РАН.
3. Выявление временных периодов, характеризующих интенсивность обратной связи между климатом и углеродным циклом.

4. Выявление эффекта транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом при продолжении антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу.
5. Выявление слабости ограничений, налагаемых на совместные модельные климата и углеродного цикла существующими данными об изменениях характеристик климата и углеродного цикла.
6. Оценка влияния на климат обратной связи между климатом и метановым циклом за счёт изменения эмиссий метана болотными экосистемами.
7. Оценка климатического влияния механизмов изменения альbedo поверхности суши при землепользовании.
8. Оценка неопределённости изменений климата и состояния экосистем в XXI веке, связанной с неопределённостью значений управляющих параметров наземной биоты и сценариев изменения площади сельскохозяйственных угодий.

Научная новизна

- Разработана и верифицирована модель наземного углеродного цикла, сочетающая в себе современную формулировку, основанную на функциональных типах растительности, и вычислительную эффективность. Модель в дальнейшем может быть расширена учётом взаимодействия углеродного цикла и циклов других химических элементов (азота, фосфора, и т.д.).
- Впервые в численных экспериментах с климатической моделью выделены временные периоды, характеризующих интенсивность обратной связи между климатом и углеродным циклом.
- Впервые в численных экспериментах с климатической моделью выявлен эффект транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом. С использованием моделей различной степени сложности показано, что проявление этого эффекта обусловлено логарифмической зависимостью радиационного возмущающего воздействия углекислого газа от его концентрации в атмосфере.
- Впервые проведён систематический анализ неопределённости знака и интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом, связанный с неопределённостью значения управляющих параметров системы, и строго показано, что уровень точности современных данных для характеристик климата и состояния экосистем недостаточен даже для определения знака этой обратной связи.

- Впервые получена оценка климатической эффективности обратной связи между климатом и метановым циклом.
- В численных экспериментах с климатической моделью впервые показано влияния изменения площади сельскохозяйственных угодий на изменение климата соответствующих регионов. В частности, уменьшение осадков в этих регионах связано с увеличением площади сельскохозяйственных угодий в них.
- Впервые проведено сравнение климатической эффективности механизмов воздействия землепользования, связанных с изменением альбедо поверхности, при реалистичных сценариях антропогенного воздействия на климатическую систему.
- Впервые показано, что неопределённость будущих антропогенных воздействий на климат, связанная с неопределённостью будущих сценариев землепользования, хотя и заметно влияет на характеристики состояния наземных экосистем, лишь немного изменяет содержание углекислого газа в атмосфере в XXI веке и состояние климата.
- Впервые количественно оценена неопределённость изменений климата в XXI веке, связанная с неопределённостью значений управляющих параметров наземной биоты.

Научная и практическая значимость

- Разработанная глобально–осреднённая климатическая модель с углеродным циклом используется в курсах лекций "Основы теории климата" , читаемых на кафедре физики атмосферы физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и на кафедре термогидромеханики океана факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико–технического института.
- Разработанная пространственно–распределённая модель наземного углеродного цикла может быть использована в широком классе климатических моделей для воспроизведения прошлых изменений климата и для оценки вклада углеродного цикла в климатические изменения, ожидаемые в будущем.
- Выявленные характерные периоды значимости обратной связи между климатом и углеродным циклом, а также выявленный эффект транзитивного насыщения этой обратной связи улучшают понимание динамики климатической системы и для анализа применимости тех или иных моделей для воспроизведения эволюции системы в заданный период.

- Результаты анализа характеристик неопределённости будущих изменений углеродного цикла важны для количественной оценки качества эмпирических данных, описывающих глобальный углеродный цикл.
- Важным результатом является выявление относительно слабого влияния обратной связи между климатом и эмиссиями метана болотными экосистемами на изменение климатических характеристик. Это позволяет при будущих расчётах климатического отклика на внешние воздействия данную обратную связь исключить из рассмотрения.
- Важным результатом является выявление влияния изменения альbedo поверхности при землепользовании на региональный отклик температуры атмосферы у поверхности и, в особенности, осадков. В частности, этот результат позволяет связать уменьшение осадков в основных сельхозпроизводящих регионах мира, известное по наблюдениям за XX век, с расширением площади сельскохозяйственных угодий в этих регионах. Указанные результаты дополнительно подтверждены анализом климатической эффективности механизмов изменения альbedo при землепользовании и могут быть использованы при прогнозировании дальнейшего вовлечения земель в сельскохозяйственный оборот.
- Проведённые расчёты изменения климата и глобального углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости, возникающей из-за неопределённости значений управляющих параметров модели и сценариев изменения площади сельскохозяйственных угодий, открывают новые перспективы в численном моделировании климата, при которых климатический отклик на внешние воздействия оценивается не только в терминах "средней" ("наиболее вероятной") траектории, но и интервала неопределённости (например, доверительного интервала или стандартного отклонения) таких оценок.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались автором на заседаниях Учёного совета Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (2005–2010 гг.), на заседаниях Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета РАН (2005 г.), на семинарах Отдела исследования климатических процессов Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (2005–2010 гг.), семинаре Метеорологического института им. Макса Планка (Гамбург, ФРГ, 2009 г.), на ежегодных ассамблеях Европейского геофизического общества/Европейского геофизического союза (2003 г., 2008 г., 2010 г.), Всемирной конференции по изменению климата (Москва, 2003 г.), международной конференции Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions (Копенгаген, 2009 г.), международной конференции

ENVIROMIS (Томск, 2006, 2008, 2010 гг.), международной конференции "Криогенные ресурсы полярных регионов" (Пушино, Тюмень, 2005, 2007, 2008 гг.), Международном симпозиуме "Физика атмосферы: наука и образование" (Санкт-Петербург, 2007 г.), Восьмом сибирском совещании по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2009 г.), школах молодых учёных "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы" (проводящихся совместно ИФА им. А.М. Обухова РАН, ИПФ РАН и геофизической обсерваторией "Борок" ИФЗ РАН, 2006–2009 гг.)

По теме диссертации опубликована 51 работа, в том числе 33 — в отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях.

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в работе, получены автором лично. В работах, относящихся к выносимым на защиту результатам и выполненным в соавторстве, основная идея исследования принадлежала автору.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из Введения, 10 глав, сгруппированных в 4 части, Заключения и списка литературы из 459 названий. В ней содержится 331 страница, 6 таблиц, 71 рисунок.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность работы, приводится обзор современного состояния исследований, посвящённых взаимодействию климата и экосистем, а также вопросам постановки и анализа ансамблевых численных экспериментов с климатическими моделями, формулируются цели работы, аргументируются методы исследования, научная новизна и научная и практическая значимость работы, а также приводятся этапы апробации диссертации.

Первая часть работы посвящена разработке и внедрению в КМ ИФА РАН глобально осреднённой модели углеродного цикла и анализу взаимодействия климата и углеродного цикла на декадных и вековых масштабах.

Первая глава посвящена анализу взаимодействия климата и углеродного цикла на декадных и вековых масштабах. В **разделе 1.1** приводится описание глобально осреднённых блоков океанического и наземного углеродного цикла, включённых в КМ ИФА РАН. Блок наземного углеродного цикла основан на общепринятых балансовых уравнениях, учитывающих зависимость продуктивности растительности и дыхания почвы от состояния климата. В этом блоке

также явно учитывается фертилизация наземной растительности углекислым газом атмосферы. В качестве блока расчёта поглощения углекислого газа из атмосферы океаном используется одна из двух схем: билинейная зависимость текущего значения потока CO_2 из атмосферы в океан $F_{\text{CO}_2,o}$ от скорости изменения содержания углекислого газа в атмосфере dq_{CO_2}/dt и скорости изменения глобально осреднённой температуры поверхности океана $dT_{o,g}/dt$ (t — время). В дальнейшем эта версия модели обозначается TCCGlob–FocL. Следует отметить, что указанная билинейная зависимость $F_{\text{CO}_2,o}$ от dq_{CO_2}/dt и $dT_{o,g}/dt$, хотя и согласуется с имеющимися данными о величине потока углекислого газа из атмосферы в океан, не может быть использована, например, в модельных расчётах с прекращением антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу. В связи с последним в диссертации используется также версия КМ ИФА РАН, в дальнейшем обозначаемая TCCGlob–FocNL, где такая указанная простая схема расчёта $F_{\text{CO}_2,o}$ заменена на модель Бакастоу, но с учётом зависимости констант химических реакций от температуры. В **разделе 1.2** проводится описание численных экспериментов с обеими версиями КМ ИФА РАН. В указанных численных экспериментах использовались реконструкции и эмпирические данные для эмиссий CO_2 в атмосферу для 1860–2000 гг., продолженные сценариями семейства SRES для XXI века. Другие внешние воздействия на климат в расчётах этой главы не учитываются. Для каждой из версий КМ ИФА РАН проводится два варианта расчётов — с полной моделью (вариант TOT, подобные интегрированиям "coupled" проекта C⁴MIP) и с моделью, в которой связь влияния климатических изменений на динамику углеродного цикла не учитывается (вариант NOCLIM, подобный численным экспериментам "uncoupled" проекта C⁴MIP). В **разделе 1.3** проводится сравнение результатов этих расчётов с имеющимися эмпирическими данными о характеристиках глобального углеродного цикла для индустриального периода. В частности, для обеих версий модели ошибка воспроизведения изменения q_{CO_2} не превышает 10 млн⁻¹. Такая ошибка характерна и для ряда других современных климатических моделей с углеродным циклом. Изменение глобальной температуры в XX веке в расчётах с вариантом TOT КМ ИФА РАН составляет 0.76 К, что согласуется с данными наблюдений. КМ ИФА РАН также хорошо воспроизводит значения потоков углекислого газа из атмосферы в океан $F_{\text{CO}_2,o}$ и наземные экосистемы $F_{\text{CO}_2,l}$ для последних десятилетий XX века, а также кумулятивное поглощение углекислого газа океаном и наземными экосистемами за последние полтора столетия. Важным результатом является то, что общее удовлетворительное воспроизведение этих характеристик отмечается как в расчётах с полной моделью (TOT), так и в расчётах с односторонней связью (NOCLIM). Это указывает на то, что изменения характеристик климата и углеродного цикла в целом были малы вплоть до последних десятилетий XX века и не позволяют достоверно судить об интенсивности обратной связи между ними.

Раздел 1.4 посвящён анализу взаимодействия климата и углеродного цикла в XXI веке. В КМ ИФА РАН в зависимости от сценария эмиссий SRES концентрация углекислого газа

в атмосфере к концу XXI века возрастает до $615 - 875 \text{ млн}^{-1}$ в версии TCCGlob-FocL и до $472 - 720 \text{ млн}^{-1}$ в версии TCCGlob-FocNL. Рост глобально осреднённой температуры атмосферы у поверхности относительно доиндустриального состояния в модели к последним десятилетиям XXI века составляет соответственно $2.4 - 3.4 \text{ К}$ и $1.5 - 2.6 \text{ К}$. В численном эксперименте TOT к концу этого столетия взаимодействие климата и углеродного цикла дополнительно (относительно расчётов NOCLIM) увеличивает содержание углекислого газа в атмосфере на $67 - 90 \text{ млн}^{-1}$ и $87 - 134 \text{ млн}^{-1}$ для версий TCCGlob-FocL и TCCGlob-FocNL соответственно. Этот дополнительный рост q_{CO_2} больше для более агрессивных сценариев по сравнению с менее агрессивными. Как следствие, для таких сценариев возрастает дополнительное (связанное с взаимодействием между климатом и углеродным циклом) потепление у поверхности. К концу XXI века оно составляет $0.31 - 0.35 \text{ К}$ в версии TCCGlob-FocL и $0.39 - 0.41 \text{ К}$ в версии TCCGlob-FocNL, т.е. около 10% от полного роста $T_{a,g}$ в XXI веке. Большая разность отклика температуры и концентрации углекислого газа между численными экспериментами TOT и NOCLIM в версии TCCGlob-FocNL по сравнению с версией TCCGlob-FocL связана с большей температурной чувствительностью потока $F_{\text{CO}_2,o}$ для версии FocNL по сравнению с версией FocL.

Для обеих версий модели можно определить временные интервалы характерного поведения обратной связи между климатом и углеродным циклом. Вплоть до середины XX века в обеих версиях модели поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы мало различается между численными экспериментами TOT и NOCLIM. Для поглощения углерода океаном это справедливо вплоть до конца XX века. Как следствие, в XX веке обратная связь между климатом и углеродным циклом не является сильной и вплоть до середины этого столетия интенсивность поглощения определяется, в основном, прямыми эффектами роста содержания CO_2 в атмосфере (фертилизацией растений углекислым газом и разностью парциальных давлений углекислого газа между нижним слоем атмосферы и верхним слоем океана). В численных экспериментах TOT $F_{\text{CO}_2,l}$ достигает максимума в начале XXI века (в обеих версиях модели), а $F_{\text{CO}_2,o}$ — в первой половине этого столетия (для версии TCCGlob-FocNL). Различия изменения концентрации углекислого газа в атмосфере между вариантами модели TOT и NOCLIM связаны в основном с различием изменения запаса углерода в почве C_s , который в экспериментах TOT уменьшается со временем. К концу XXI века уменьшение C_s в зависимости от сценария составляет от 60 ПгС до 140 ПгС для версии TCCGlob-FocL и от 58 ПгС до 138 ПгС — для версии TCCGlob-FocNL. В экспериментах же NOCLIM уменьшение C_s наблюдается только до конца XX века, а затем запас углерода в почве монотонно растёт. Различия изменения запаса углерода в других резервуарах между экспериментами REF и NOCLIM заметно меньше, чем различия изменения C_s .

Дальнейший анализ взаимодействия между климатом и углеродным циклом можно про-

вести в терминах соответствующего параметра обратной связи f_{CO_2} (см. (1) с $c = \text{TOT}$, $u = \text{NOCLIM}$), изображённого на рис. 1. В начале индустриального периода его значение близко к единице. Затем значение f_{CO_2} увеличивается и достигает максимума в середине XX века. После этого f_{CO_2} несколько уменьшается, достигая вторичного минимума в начале 1980–х гг. Начиная с последних десятилетий XX века параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом в целом увеличивается.

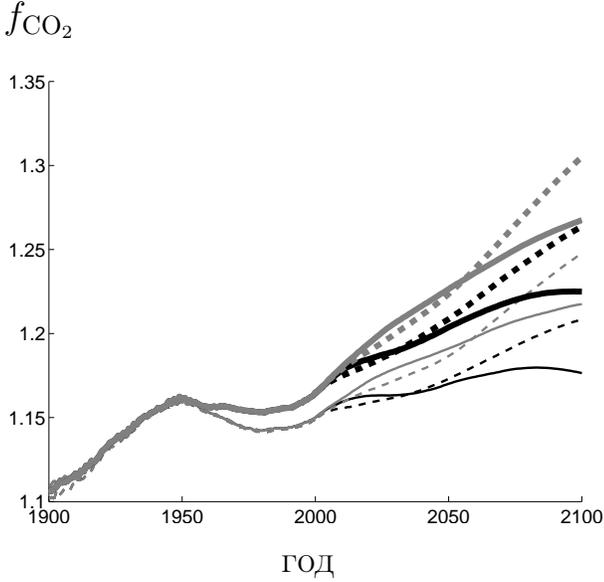


Рис. 1. Параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом в численных экспериментах с версиями КМ ИФА РАН TCCGlob-FocL и TCCGlob-FocNL (тонкие и толстые кривые соответственно) при сценариях антропогенных эмиссий CO_2 SRES A2, A1B, B2 и B1 (чёрные сплошные, чёрные прерывистые, серые сплошные и серые прерывистые линии соответственно).

При этом кумулятивные (начиная с начала интегрирования и заканчивая текущим моментом времени t) потоки углерода из атмосферы в наземные экосистемы и океан оцениваются согласно

$$\begin{aligned} U_{\text{CO}_2, X}^{\text{TOT}}(t) &= \int_{1860 \text{ г.}}^t F_{\text{CO}_2, X}^{\text{TOT}}(\tau) d\tau = \beta_X \Delta q_{\text{CO}_2}^{\text{TOT}} + \gamma_X \Delta T_{a, g}^{\text{TOT}}, \\ U_{\text{CO}_2, X}^{\text{NOCLIM}}(t) &= \int_{1860 \text{ г.}}^t F_{\text{CO}_2, X}^{\text{NOCLIM}}(\tau) d\tau = \beta_X \Delta q_{\text{CO}_2}^{\text{NOCLIM}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $X = l, o$. Коэффициенты β_X и γ_X характеризуют изменение $U_{\text{CO}_2, X}$ за счёт прямых эффектов изменения содержания углекислого газа в атмосфере и климатических вариаций соответственно. В частности, отрицательные (положительные) γ_X соответствуют положитель-

В последующее примерно столетие для всех сценариев наблюдается монотонный рост f_{CO_2} . Подобный рост наблюдается и для последних двадцати лет расчётов при сценариях A1B, B1, B2. Однако в эти последние два десятилетия при сценарии эмиссий A2 (существенно более агрессивного, чем сценарии A1B, B1, B2) параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом уменьшается. Этот эффект был назван нами транзитивным насыщением обратной связи между климатом и углеродным циклом. Более подробно он будет рассмотрен в главе 2 диссертации.

К концу XXI века для рассмотренных в данной работе сценариев параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом близок к величине 1.2 для версии TCCGlob-FocL и 1.2–1.3 — для версии TCCGlob-FocNL. При этом он оказывается большим для менее агрессивных сценариев по сравнению с более агрессивными.

Взаимодействие климата на декадных и вековых масштабах может быть описано в терминах коэффициентов, введённых в [Friedlingstein et al., 2003].

ной (отрицательной) обратной связи между климатом и углеродным циклом. В нашей работе такие коэффициенты были вычислены для скользящих окон 100-летней длины. В проведённых численных экспериментах с КМ ИФА РАН коэффициент β_l монотонно уменьшается со временем для обеих версий модели. Для столетия 1860–1959 гг., его значение равно 1.5 – 1.6 ПгС/млн⁻¹. Для 2001–2100 гг. β_l уменьшается до 0.9 – 1.4 ПгС/млн⁻¹ в версии TCCGlob-FocL и до 0.8 – 1.3 ПгС/млн⁻¹ в версии TCCGlob-FocNL (меньшие значения из этих интервалов соответствуют более агрессивным сценариям). В версии TCCGlob-FocNL коэффициент β_o уменьшается от 1.5 ПгС/млн⁻¹ в 1860–1959 гг. до 0.6 – 0.9 ПгС/млн⁻¹ в 2001–2100 гг. С другой стороны, изменение γ_l существенным образом различается между версиями TCCGlob-FocL и TCCGlob-FocNL. Для первой версии значения этого коэффициенты уменьшаются с течением времени. Для первой версии модуль значения этого коэффициента немного уменьшается с течением времени от 200 ПгС К⁻¹ в 1860–1959 гг. до $-(160 - 190)$ ПгС К⁻¹ в 2001–2100 гг. Для второй версии КМ ИФА РАН $\gamma_l = -80$ ПгС К⁻¹ в 1860–1959 гг. и изменяется до $-(130 - 170)$ ПгС К⁻¹ в 2001–2100 гг. Для обеих версий КМ ИФ РАН меньшие абсолютные значения из этих интервалов соответствуют более агрессивным сценариям.

Ещё сильнее между двумя версиями модели различаются γ_o . По построению этот коэффициент тождественно равен 1.3 ПгС К⁻¹ для версии TCCGlob-FocL. Для версии TCCGlob-FocNL его абсолютное значение монотонно возрастает со временем. Для этой версии значение γ_o составляет -6 ПгС К⁻¹ в 1860–1959 гг. и от -18 ПгС К⁻¹ до -21 ПгС К⁻¹ в 2001–2100 гг.

Раздел 1.5 посвящён обсуждению результатов главы 1.

Глава 2 работы посвящена анализу эффекта транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом. В **разделе 2.1** приводится анализ механизма транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом с использованием концептуальной модели. Физически транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом связано с логарифмической зависимостью радиационного возмущающего воздействия углекислого газа R_{CO_2} от его концентрации в атмосфере. Как следствие, при росте q_{CO_2} вклад дополнительного (связанного со взаимодействием между климатом и углеродным циклом) радиационного возмущающего воздействия углекислого газа в общий радиационный форсинг уменьшается. Логарифмическая зависимость радиационного форсинга углекислого газа от его концентрации объясняет также то, почему транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом проявляется лишь при агрессивном сценарии антропогенного воздействия на климат. Большая величина эмиссий приводит к быстрому накоплению углекислого газа в атмосфере. При этом эффект насыщения парникового форсинга приводит к относительно небольшим дополнительным изменениям температуры, снова уменьшая вклад обратной связи между климатом и углеродным циклом в общее изменение q_{CO_2} . Рассмотрим случай полной модели климата–углеродного цикла и случай модели

с односторонней связью, в которой изменения климата не влияют на характеристики углеродного цикла (эти два случая в главе 2 обозначаются верхним индексом Y , принимающим значения c и u соответственно). Линеаризуя потоки углекислого газа из атмосферы в океан и наземные экосистемы, можно получить

$$F_{\text{CO}_2, Y}^c = \beta_Y dq_{\text{CO}_2}^c/dt + \gamma_Y dT_{a,g}^c/dt, \quad F_{\text{CO}_2, Y}^u = \beta_Y dq_{\text{CO}_2}^u/dt, \quad (4)$$

где индекс $Y = o$ соответствуют океану, а $Y = l$ — наземным экосистемам. Тогда из уравнения баланса массы CO_2 в атмосфере для изменений относительно доиндустриального состояния можно записать

$$\Delta q_{\text{CO}_2}^c = \Delta q_{\text{CO}_2}^u + \kappa T_{a,g}^c \quad (5)$$

с $\kappa = -(\gamma_l + \gamma_o)/(c_o + \beta_l + \beta_o)$. Для полной модели уравнение баланса энергии в линейном приближении

$$C d\Delta T_{a,g}^c/dt = R_{\text{CO}_2} - \lambda \Delta T_{a,g}^c \quad (6)$$

где $R_{\text{CO}_2}^c = R_0 \ln(q_{\text{CO}_2}^c/q_{\text{CO}_2,0})$ с $R_0 = 5.4 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$, $q_{\text{CO}_2,0}$ — начальное значение концентрации углекислого газа в атмосфере, C — теплоёмкость системы на единицу площади. Параметр климатической чувствительности λ выражается через равновесное увеличение глобальной приповерхностной температуры при удвоении содержания CO_2 в атмосфере $\Delta T_{2 \times \text{CO}_2}$ согласно $\lambda = R_0 \ln 2 / \Delta T_{2 \times \text{CO}_2}$. Из (5) и (6), предполагая, что $\Delta q_{\text{CO}_2}^c - \Delta q_{\text{CO}_2}^u \ll \Delta q_{\text{CO}_2}^u$, можно получить линейное эволюционное уравнение для обратной связи между климатом и углеродным циклом с зависящими от времени коэффициентами. Вводя предположение, математически эквивалентное тому, что при продолжающихся эмиссиях углекислого газа наблюдается монотонный рост $q_{\text{CO}_2}^u$ со временем, можно показать, что f_{CO_2} стремится к единице при $t \rightarrow +\infty$. Это и указывает на транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом при продолжающихся антропогенных эмиссиях.

Если дополнительно считать, что $t = 0$ соответствует моменту начала антропогенных эмиссий, то для эволюционного уравнения для f_{CO_2} физический смысл имеет лишь начальное условие $f_{\text{CO}_2}|_{t=0} = 1$. Причиной этого является инерционность климата, приводящая в начальный период интегрирования к пренебрежимо малым различиям между расчётами с полной моделью и с моделью с односторонней связью между климатом и углеродным циклом. Как следствие, при указанных условиях траектория f_{CO_2} , начинаясь из единицы, возвращается в неё к концу интегрирования. С учётом положительности обратной связи между климатом и углеродным циклом на всём протяжении интегрирования $f_{\text{CO}_2} \geq 1$. Из непрерывности решения дифференциального уравнения по времени при этом следует наличие хотя бы одного максимума f_{CO_2} .

Подобно [Friedlingstein et al., 2003] можно определить транзитивную чувствительность климата в виде $\alpha = dT_{a,g}^c/dq_{\text{CO}_2}^c$. Тогда логарифмическая зависимость радиационного возмуща-

ющего воздействия углекислого газа от его концентрации должна при росте последней со временем приводить к уменьшению α в процессе интегрирования. Как следствие, транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом связано с подобным уменьшением α во времени.

В разделе 2.2 проводится анализ результатов численного интегрирования концептуальной модели транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом. При этом рассматривались антропогенные эмиссии углекислого газа вида $E_{\text{CO}_2} = E_0 e^{t/t_p}$ с небольшим начальным $E_0 = 0.1$ ПгС г.⁻¹ и постоянным t_p . В дальнейшем в различных расчётах t_p меняется от 25 лет до 250 лет. Несмотря на то, что при такой зависимости эмиссий от времени цель воспроизвести какие-либо прошлые или будущие антропогенные эмиссии не ставится, всё же отметим, что объединение реконструкций антропогенных эмиссий в XIX–XX веках и эмиссий CO₂ по сценариям SRES в XXI веке (за исключением сценария B1) может быть приближена экспоненциальной зависимостью от времени с t_p , меняющимся в зависимости от сценария от 50 лет до 200 лет. Отдельные интегрирования построенной концептуальной модели проводились при фиксированных значениях κ , β и $\Delta T_{2 \times \text{CO}_2}$. Диапазоны изменения первой и второй переменной был получен по результатам интегрирования моделей ансамбля C⁴MIP при сценарии антропогенных эмиссий SRES A2 и составили $\kappa = (8 - 48)$ млн⁻¹ К⁻¹ и $\beta = 1.7 - 3.7$ ПгС/млн⁻¹. Значения κ и β , получаемые в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН (см. ниже), также находятся внутри этого диапазона. В дальнейших расчётах с концептуальной моделью взаимодействия климата и углеродного цикла β меняется от нуля до 5 ПгС/млн⁻¹. В свою очередь, равновесная чувствительность климата к удвоению углекислого газа в атмосфере в различных численных экспериментах с концептуальной моделью взаимодействия климата и углеродного цикла менялась от 1 К до 9 К.

Во всех проведённых численных экспериментах с концептуальной моделью f_{CO_2} достигает максимума, а затем снова уменьшается до единицы. Время достижения максимума в разных расчётах составляет $t_{f_{\text{max}}} = (2 - 8) \times t_p$ в зависимости от значений других параметров. При сужении интервала изменения $\Delta T_{2 \times \text{CO}_2}$ до характерного для современных трёхмерных численных моделей климата (2.0–4.5 К) или при сужении интервала изменения β , соответствующего моделям ансамбля C⁴MIP, диапазон изменения $t_{f_{\text{max}}}/t_p$ меняется мало для рассматриваемой концептуальной модели. Полученные значения $t_{f_{\text{max}}}/t_p$ практически не зависят от выбранного значения κ . В целом рост $\Delta T_{2 \times \text{CO}_2}$ и/или β способствует увеличению $t_{f_{\text{max}}}/t_p$. Ему также способствует уменьшение t_p .

В разделе 2.3 проводится анализ идеализированных численных экспериментов с КМ ИФА РАН, подобных проведённым в разделе 2.2 с концептуальной моделью. В этих расчётах, как и в расчётах раздела 1.4, параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом достигает максимума, а затем уменьшается, приближаясь к единице (рис. 2). Для использо-

ванного в данной работе интервала изменений t_p время достижения максимума параметра обратной связи между климатом и углеродным циклом $t_{f_{max}}$ меняется от $3 \times t_p$ до $5 \times t_p$ в расчётах с версией TCCGlob-FocL и от $5 \times t_p$ до $8 \times t_p$ в расчётах с версией TCCGlob-FocNL. Для обеих версий при росте t_p отношение $t_{f_{max}}/t_p$ уменьшается.

Коэффициенты γ_X и β_X ($X = l, o$), входящие в (3), были рассчитаны по скользящим 100-летним отрезкам. Для обеих версий модели изменение во времени коэффициентов γ_X and β_X ведёт к росту модуля κ со временем, если только начальный период интегрирования модели уже пройден. Как следствие, общее уменьшение характеристик обратной связи между климатом и углеродным циклом g_{CO_2} и f_{CO_2} обусловлено уменьшением α со временем.

Транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом в численных экспериментах с КМ ИФА РАН достигается при q_{CO_2} из интервала от 3226 млн^{-1} до 6152 млн^{-1} (от 3679 млн^{-1} до 12799 млн^{-1}) для версии TCCGlob-FocL (TCCGlob-FocNL). Наименьшие значения из этих интервалов достигаются при наибольших значениях t_p . Значения из нижних частей этих диапазонов, возможно, достигались в период климатического оптимума раннего эоцена.

В разделе 2.4 проводится обсуждение результатов главы 2. Согласно результатам, полученным в данной главе, в начальный период отклика климата на рост содержания парниковых газов вследствие антропогенных эмиссий (т.е. при $t \ll t_p$), начиная от доиндустриального значения концентрации углекислого газа в атмосфере, а также после достаточно продолжительного периода таких эмиссий (при $t \gg t_p$), состояние системы климат-углеродный цикл близко к состоянию системы с односторонней связью, при которой изменения климата не влияют заметно на изменения характеристик углеродного цикла. Однако в промежуточный период,

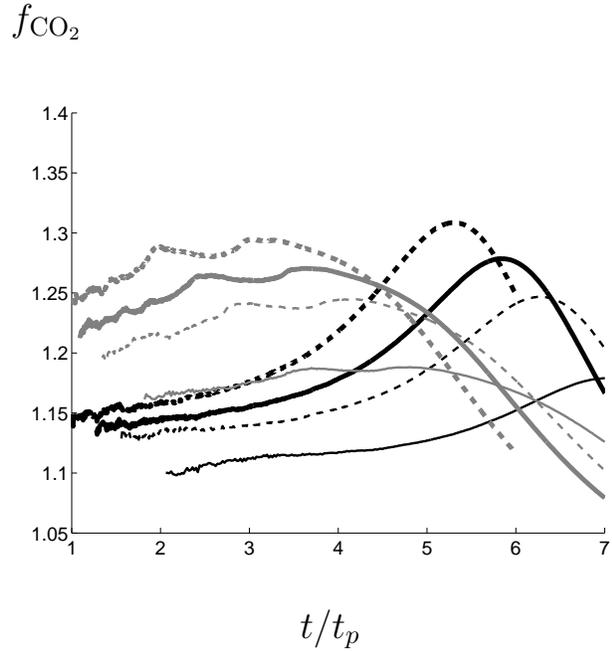


Рис. 2. Параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом в численных экспериментах с версиями TCCGlob-FocL и TCCGlob-FocNL КМ ИФА РАН (серые и чёрные линии соответственно) при задании антропогенных эмиссий CO_2 в экспоненциальном виде с характерным временем роста $t_p = 50$ лет (тонкие сплошные линии), $t_p = 100$ лет (тонкие прерывистые линии), $t_p = 150$ лет (толстые сплошные линии) и $t_p = 200$ лет (толстые прерывистые линии). По оси абсцисс отложено нормированное время t/t_p .

когда $t \simeq t_p$, f_{CO_2} заметно отличается от единицы и взаимодействие климата и углеродного цикла играет существенную роль в эволюции климата. Согласно результатам, полученным в главе 1, несмотря на малый вклад такого взаимодействия вплоть до середины XX века, в последующий период следует ожидать усиления взаимодействия климата и углеродного цикла. Если рост антропогенных эмиссий углекислого газа в атмосферу продолжится и в будущем несколько столетий, то с учётом характерной скорости роста эмиссий для сценариев SRES, для которых $t_p = 50 - 200$ лет, указанный промежуточный период продлится несколько последующих столетий. После этого транзитивное насыщение обратной связи между климатом и углеродным циклом приведёт к постепенному ослаблению последней. При сохранении современных темпов роста скорости антропогенных эмиссий CO_2 длительность этого периода также составит несколько столетий.

Глава 3 посвящена анализу влияния современной неопределённости характеристик взаимодействия климата и углеродного цикла на их поведение в XXI веке. В **разделе 3.1** обсуждается неопределённость современных знаний о характеристиках углеродного цикла в индустриальный период, в том числе, связанная с откликом различных процессов на климатические изменения, а также аргументируется необходимость систематического анализа этой неопределённости на отклик системы "климат–углеродный цикл" при усиливающихся антропогенных воздействиях. В **разделе 3.2** описываются ансамблевые численные эксперименты с версией TCCGloб–FocL КМ ИФА РАН, поставленный с целью такого анализа. В целом их постановка подобна постановке численных экспериментов главы 1, но с изменением ряда управляющих параметров наземного углеродного цикла модели между различными реализациями этого ансамбля. Кроме того, из-за вычислительных ограничений рассматривается только сценарий антропогенного воздействия SRES A2. Источники неопределённости расчёта, отличные от значений параметров наземного углеродного цикла, в главе не рассматриваются. В связи с последним приведённые в данной главе результаты для характеристик неопределённости следует рассматривать как оценки снизу. В **разделе 3.3** описывается байесов метод анализа ансамбля численных экспериментов. Необходимость его использования связана с тем, что для ряда реализаций указанных ансамблевых экспериментов количественные характеристики климата и углеродного цикла заметно отличаются от наблюдений для XX века. Используемый метод позволяет объективно вычислять ансамблевое среднее $E(Y|D)$ и стандартное отклонение $\sigma(Y|D)$ величины Y при условии её соответствия набору данных наблюдений D . При этом влияние нереалистичных членов ансамбля на $E(Y|D)$ и $\sigma(Y|D)$ исключается. В качестве массива данных D использовались оценки потоков углекислого газа из атмосферы в океан и наземные экосистемы для 1980–х и 1990–х гг. и изменения концентрации углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} в 1958–2004 гг.

В **разделе 3.4** описаны основные результаты главы 3. Для концентрации углекислого га-

за в атмосфере q_{CO_2} байесовое осреднение существенно уменьшает диапазон неопределённости расчётов: внутриансамблевое стандартное отклонение в конце XXI века составляет 182 млн^{-1} для простого осреднения и не более 46 млн^{-1} при байесовом осреднении. Средние значения различаются незначительно внутри ансамбля, достигая к 2100 г. 859 млн^{-1} при простом осреднении и 812 млн^{-1} (818 млн^{-1}) при указанном байесовом осреднении. Тем не менее, простое ансамблевое среднее находится систематически выше, чем байесовы средние. Наиболее близкими к простому среднему оказываются значения байесового среднего при учёте только данных наблюдений для концентрации CO_2 и игнорировании данных для потоков $F_{\text{CO}_2,l}$ и $F_{\text{CO}_2,o}$. Если же учесть только данные для потоков и игнорировать данные для концентрации углекислого газа в атмосфере, то байесово среднее несколько уменьшается. Таким образом, для заданного сценария эмиссий при настройке модели лишь по данным для концентрации CO_2 в атмосфере будущая концентрация углекислого газа в атмосфере оказывается выше, чем при настройке по данным о стоке углекислого газа из атмосферы в наземные экосистемы и в океан.

Как и в случае оценок будущей концентрации углекислого газа в атмосфере, байесово осреднение уменьшает математическое ожидание для оценки интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом, определяемой как $I_{q_{\text{CO}_2}} = q_{\text{CO}_2}^c - q_{\text{CO}_2}^u$, где верхние индексы c и u определены так же, как и в главе 2. Так, при простом осреднении членов ансамбля в 2100 г. $I_{q_{\text{CO}_2}} = (136 \pm 213) \text{ млн}^{-1}$ (здесь и далее после знака " \pm " указано $\sigma(Y|D)$), см. рис. 3. При байесовом осреднении с параметрами функций распределения для потоков углекислого газа из атмосферы в наземные экосистемы и в океан (59 ± 98) млн^{-1} . Следует отметить, что байесовы оценки $I_{q_{\text{CO}_2}}$ согласуются с наиболее вероятным интервалом для сценария SRES A2 в конце XXI века, полученным в рамках проекта сравнения климатических моделей с углеродным циклом C⁴MIP и составляющим $50 - 100 \text{ млн}^{-1}$.

Важным фактом является то, что полученный диапазон неопределённости интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом расположен как в верхней, так и в нижней полуплоскости относительно прямой $I_{q_{\text{CO}_2}} = 0$. Тем не менее, положительная обратная связь является более вероятной, отражением чего является $E(I_{q_{\text{CO}_2}}|D) > 0$.

При использованном сценарии антропогенного воздействия SRES A2 при простом осреднении по ансамблю глобальный мгновенный радиационный форсинг углекислого газа на верхней границе атмосферы $R_{\text{CO}_2,g}$ относительно доиндустриального состояния к концу XXI века достигает $(6.9 \pm 1.3) \text{ Вт м}^{-2}$. При байесовом осреднении математическое ожидание радиационного форсинга немного уменьшается, но диапазон неопределённости существенно сужается, так что оценка $R_{\text{CO}_2,g}$ составляет $(6.7 \pm 0.4) \text{ Вт м}^{-2}$. Дополнительный рост мгновенного радиационного форсинга на верхней границе атмосферы из-за взаимодействия климата и углеродного цикла $I_{R_{\text{CO}_2,g}} = R_{\text{CO}_2,g}^c - R_{\text{CO}_2,g}^u$, при простом ансамблевом осреднении к 2100 г. оценивается величиной $(1.0 \pm 1.5) \text{ Вт м}^{-2}$. При байесовом осреднении уменьшается как ансамблевое среднее, так и ан-

самблевое стандартное отклонение, так что в этом случае $I_{R_{CO_2.g}} = (0.5 \pm 0.7) \text{ Вт м}^{-2}$. Подобно интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом, диапазон неопределённости $I_{R_{CO_2.g}}$ охватывает как положительные, так и отрицательные значения.

В разделе 3.5 приведено обсуждение результатов главы 3. Важным результатом является превышение стандартного отклонения оценки обратной связи между климатом и углеродным циклом над соответствующим ансамблевым средним. Это справедливо и для дополнительного (определяемого взаимодействием климата и углеродного цикла) роста концентрации углекислого газа в атмосфере, и для дополнительного радиационного форсинга. Это указывает на то, что наблюдательные оценки характеристик углеродного цикла налагают лишь слабые ограничения на поведение климатической системы в будущем. Последнее, в свою очередь, связано с малостью возмущений климата и углеродного цикла на протяжении XX века по сравнению с ожидаемыми в будущем. Тем не менее, положительная обратная связь является более вероятной, чем отрицательная.

Вторая часть работы посвящена анализу влияния тропосферных сульфатных аэрозолей и метанового цикла на климатический отклик.

Глава 4 посвящена оценке влияния тропосферных сульфатных аэрозолей на радиационное возмущающее воздействие и климатический отклик. В разделе 4.1 приводится обзор работ по оценке такого влияния. Целью включения этой главы в диссертационную работу является описание отклика КМ ИФА РАН на совместное воздействие антропогенных парниковых газов и аэрозоля, которое является базовым для численных экспериментов, представленных в последующих главах. В разделе 4.2 описывается модификация радиационного кода версии TCCGLOB-FocNL КМ ИФА РАН для учёта прямого РВВ тропосферных сульфатов. Косвенные климатические эффекты тропосферных аэрозолей в настоящее время в КМ ИФА РАН не учитываются. В разделе 4.3 описываются численные эксперименты с КМ ИФА РАН. Они подобны проана-

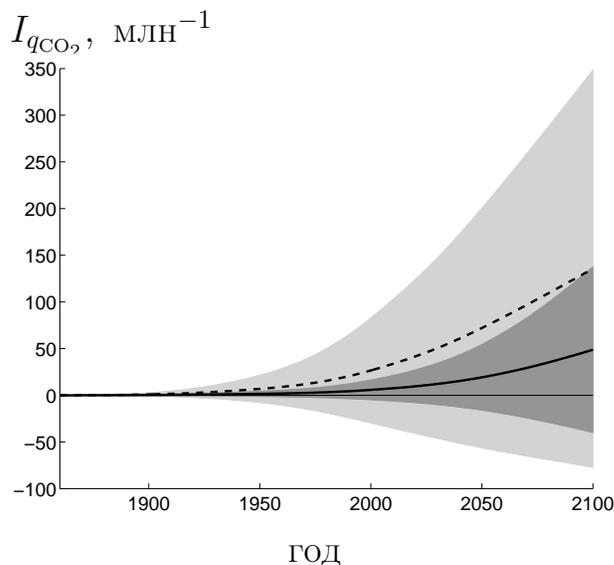


Рис. 3. Дополнительное (связанное со взаимодействием климата и углеродного цикла) изменение концентрации углекислого газа в атмосфере в построенном ансамбле численных экспериментов. Пунктиром представлено среднее по ансамблю при равном взвешивании членов ансамбля, светло-серым цветом заштрихована область, соответствующая внутриансамблевому стандартному отклонению. Сплошной кривой обозначено байесово среднее, темно-серой заливкой обозначена область, соответствующая байесовому внутриансамблевому стандартному отклонению.

лизированным в главе 1 при задании антропогенного воздействия по сценариям SRES B1, A1B и A2, но с дополнительным учётом РВВ за счёт атмосферного метана, закиси азота и тропосферных сульфатов. Концентрация последних была задана по результатам расчётов с моделью MOZART 2.0.

В разделе 4.4 проводятся оценки прямого радиационного возмущающего воздействия антропогенных сульфатных аэрозолей. Глобально осреднённое прямое РВВ в КМ ИФА РАН относительно доиндустриального состояния к середине 1990-х гг. достигает $(-0.34) \text{ Вт м}^{-2}$, что согласуется с другими оценками. Регионально этот радиационный форсинг максимален в регионах наиболее сильного сульфатного загрязнения в Европе и Северной Америке (охлаждающее РВВ более 2 Вт м^{-2}) и, в меньшей степени — в юго-восточной Азии. Для сценариев A2 и A1B рост модуля радиационного форсинга продолжается до 2030-х и 2020-х годов соответственно, так что аэрозольное радиационное возмущающее воздействие достигает для этих сценариев в указанные десятилетия $(-0.46) \text{ Вт м}^{-2}$ и $(-0.41) \text{ Вт м}^{-2}$ соответственно. В середине и конце XXI века для обоих сценариев наблюдается монотонное уменьшение РВВ. Для сценария B1 такое уменьшение отмечено на протяжении всего XXI века к концу этого столетия $R_{ASA,g}$ для сценария A2 составляет $(-0.26) \text{ Вт м}^{-2}$, для двух других сценариев — $-(0.12 - 0.14) \text{ Вт м}^{-2}$. При этом наблюдается уменьшение абсолютной величины аэрозольного радиационного форсинга по сравнению с концом XX века над Европой и рост — над юго-восточной Азией.

В разделе 4.5 обсуждается температурный отклик на совместное воздействие за счёт парниковых газов и тропосферных сульфатов. В XX веке изменение $T_{a,g}$ существенно лучше согласуется с данными наблюдений для экспериментов с учётом сульфатного аэрозоля, чем без него. Линейный тренд в XX веке в первом случае составляет 0.55 К/столетие , что находится в середине интервала неопределённости данных наблюдений $(0.4 - 0.8) \text{ К/столетие}$, во втором — 0.74 К , что близко к верхней границе этого интервала. Общий рост глобальной температуры к концу XXI века относительно доиндустриального состояния (конца XX века) составляет 2.1 К (1.5 К) при сценарии B1, 2.8 К (2.2 К) — при сценарии A1B и 3.4 К (2.8 К) — при сценарии A2. Температурный отклик в КМ ИФА РАН наиболее велик в средних и высоких широтах, особенно над сушей (более 2 К с начала индустриального периода до конца XX века), что согласуется с данными наблюдений и другими современными климатическими моделями. К середине XXI века характерные значения роста среднегодовой приповерхностной температуры T_a вне тропиков составляют $1 - 2 \text{ К}$ над океанами и $2 - 5 \text{ К}$ над сушей. К концу этого же столетия рост T_a практически во всех регионах превышает 1 К . Вне тропиков это изменение превышает 2 К , а над сушей средних и высоких широт для сценариев A1B и A2 появляются обширные области, где рост среднегодовой приповерхностной температуры превышает 5 К . Учёт прямого аэрозольного РВВ в КМ ИФА РАН снижает глобальное потепление в конце XX

столетия на 0.2 К. В середине XXI века прямое радиационное воздействие аэрозолей уменьшает рост $T_{a,g}$ на 0.25 – 0.35 К в зависимости от сценария, а в конце XXI века — на 0.1–0.2 К. Уже к концу XX века сульфатный аэрозоль заметно уменьшает потепление в средних и высоких широтах СП над океанами на несколько десятых долей градуса, а над континентами в регионах сильного аэрозольного загрязнения — на 1–1.5 К.

Концентрация углекислого газа в атмосфере в конце XXI века в численных экспериментах с учётом РВВ из-за тропосферных сульфатов понижается по сравнению с расчётами, проведёнными в главе 1 с версией модели TCCGlob-FocNL, но не более чем на 10 млн⁻¹. Вплоть до конца XX века соответствующие различия между этими двумя версиями модели не превышают 3 млн⁻¹.

В **разделе 4.6** проводится обсуждение результатов главы 4.

Глава 5 посвящена моделированию взаимодействия климата и метанового цикла. В **разделе 5.1** проводится постановка задачи. В частности, указывается, что, несмотря на значительное современное РВВ атмосферного метана и связь естественных эмиссий метана с состоянием климата, большинство современных климатических моделей не учитывают соответствующую обратную связь. Эта обратная связь обусловлена, в том числе, зависимостью эмиссий метана болотными экосистемами от состояния климата. Целью этой главы является анализ влияния взаимодействия климата и метанового цикла на климатические изменения при антропогенных воздействиях на климат. В **разделе 5.2** описаны блоки термодинамики почвы, расчёта эмиссий метана болотными экосистемами и расчёта баланса метана в атмосфере, включённые в версию TCCGlob-FocNL КМ ИФА РАН. Схема термодинамики почвы основана на модели, разработанной Кудрявцевым и соавторами, но детализированной для учёта годового хода толщины протаивания и промерзания почвы. Блок расчёта эмиссий метана болотными экосистемами основан на модели Кристенсена–Кокса, в которой эти эмиссии рассчитываются по температуре и влагосодержанию слоёв почвы с учётом годового хода этих переменных. В данной главе все болотные системы считаются насыщенными влагой. Метановый цикл модели замыкается балансовым уравнением для концентрации метана в атмосфере q_{CH_4} в приближении хорошо перемешанного газа с эффективным временем жизни метана в атмосфере 9.8 лет. Молярное количество углекислого газа, соответствующее молярному количеству атмосферного метана, разрушающегося в атмосфере за год, добавляется к ежегодному изменению q_{CO_2} , рассчитанному блоком углеродного цикла КМ ИФА РАН. В **разделе 5.3** описываются численные эксперименты с построенной совместной моделью. Они подобны численным экспериментам главы 4, но в них используются сценарии не для концентрации метана в атмосфере, а для антропогенных эмиссий этого газа. Кроме того, они удлинены назад по времени и начинаются с 1610 г. При этом имеющиеся сценарии антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 продолжены назад по времени с учётом изменения численности населения Земли. Подобно тому, как это было сделано

для углеродного цикла, модельные расчёты проводятся как с полной моделью, так и с вариантом КМ ИФА РАН, в котором изменения климата не влияют на характеристики модельного метанового цикла. В разделе 5.4 проводится сравнение характеристик метанового цикла КМ ИФА РАН в доиндустриальный период с данными реконструкций. Модель хорошо основные характеристики метанового цикла в этот период, прежде всего эмиссии метана болотными экосистемами и концентрацию метана в атмосфере.

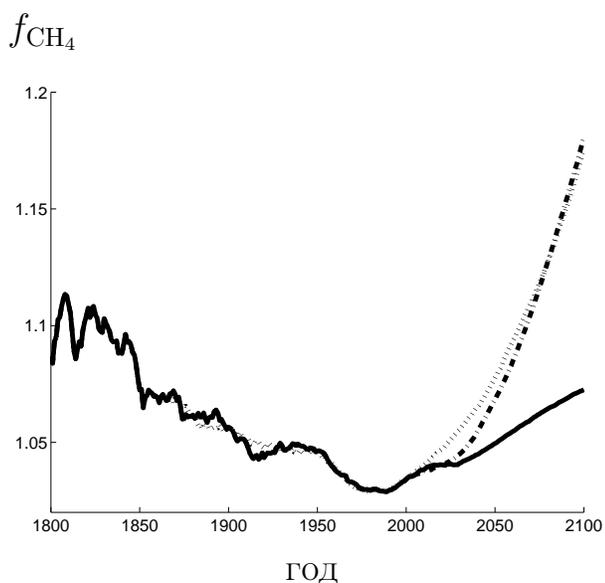


Рис. 4. Параметр обратной связи между климатом и метановым циклом в численных экспериментах с КМ ИФА РАН для сценариев А2, А1В и В1 (сплошная, штрихпунктирная и пунктирная линии соответственно)

климате, однако особенно сильно — в регионах западной Сибири и в Северной Америке, где в XXI веке при антропогенном потеплении получен большой рост T_a . Эмиссии метана внетропическими болотными экосистемами к концу XXI в экспериментах с полной моделью возрастают до $57 - 70 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$ в зависимости от сценария антропогенного воздействия. Увеличение эмиссий метана от тропических болотных экосистем меньше, чем от внетропических. К концу XXI в полной модели они возрастают до $112 - 122 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$ в зависимости от сценария антропогенного воздействия. Сравнение экспериментов с различными вариантами модели показывают, что рост эмиссий метана болотными экосистемами определяется, в основном, температурной зависимостью производства метана. Модель также хорошо воспроизводит изменения концентрации метана в атмосфере $q_{\text{СН}_4}$ для XVII–XX веков. Так, для 1991–2000 гг. эта величина меняется в интервале от 1750 млрд^{-1} до 1843 млрд^{-1} , согласуясь с наблюдаемы-

В разделе 5.5 анализируется отклик характеристик метанового цикла и климата в КМ ИФА РАН на внешние воздействия в XVII–XXI веках. В численных экспериментах с полной моделью для 1961–1990 гг. эмиссии метана болотными экосистемами составляют $133 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$. Вклад тропических болотных экосистем в полные эмиссии составляет $99 - 100 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$, а внетропических — $34 - 39 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$. Эти величины согласуются с наблюдательными и модельными оценками. Для XVII–XX веков полные эмиссии метана болотными экосистемами меняются незначительно. В XXI веке в КМ ИФА РАН происходит заметный рост эмиссий метана от болотных экосистем. К концу XXI века их значения в численных экспериментах с полной моделью достигают $168 - 191 \text{ ТгСН}_4 \text{ г.}^{-1}$ в зависимости от сценария антропогенного воздействия. Рост этих эмиссий отмечен для всех регионов, где метан выделяется при современном

ми значениями. В XXI веке в полной версии модели при агрессивном сценарии эмиссий A2 концентрация метана в атмосфере монотонно возрастает до примерно 3900 млрд^{-1} . При более умеренных сценариях эмиссий A1B и B1 q_{CH_4} растёт вплоть до середины XXI века, достигая значений около 2400 млрд^{-1} и 2100 млрд^{-1} соответственно, а затем уменьшается, достигая к концу XXI века значений, близких к 2000 млрд^{-1} и 1750 млрд^{-1} соответственно. Глобальное мгновенное РВВ метана на верхней границе атмосферы в полной версии модели к концу XXI века составляет 1.1 Вт м^{-2} , 0.5 Вт м^{-2} и 0.4 Вт м^{-2} при сценариях A2, A1B и B1 соответственно. Эти величины существенно меньше величин соответствующего радиационного форсинга за счёт CO_2 в атмосфере (6.9 Вт м^{-2} при сценарии A2 и 4.5 Вт м^{-2} при сценарии B1).

Влияние изменений климата на содержание метана в атмосфере может быть оценено с помощью параметра обратной связи между климатом и метановым циклом f_{CH_4} , определённым подобно тому, как это было сделано для параметра обратной связи между климатом и углеродным циклом (см. (1)). Взаимодействие климата и метанового цикла увеличивает рост содержания метана в атмосфере относительно начала интегрирования на 5–10% вплоть до конца XX века (рис. 4). Для агрессивного сценария эмиссий A2 эта оценка остаётся справедливой вплоть до конца XXI века. При сценариях A1B и B1 параметр обратной связи f_{CH_4} резко возрастает в XXI веке вплоть до значений около 1.2.

Тем не менее, глобальное мгновенное РВВ на верхней границе атмосферы за счёт метана $R_{\text{CH}_4,g}$ не меняется существенно между соответствующими расчётами с полной моделью и с вариантом модели с односторонней связью между климатом и метановым циклом. По абсолютной величине различие глобального радиационного форсинга между этим численными экспериментами не превышает 0.07 Вт м^{-2} . Как следствие, различие изменений $T_{a,g}$ между экспериментами с этими вариантами модели к концу XXI века не превышает 0.05 К (или 1–2% от общего потепления относительно доиндустриального периода). На региональном уровне соответствующие различия T_a также невелики.

В разделе 5.6 проводится обсуждение результатов главы 5.

Третья часть диссертационной работы посвящена анализу биогеофизических механизмов влияния экосистем на состояние климата.

Глава 6 посвящена анализу влияния биогеофизических эффектов землепользования на состояние климата. В разделе 6.1 проводится обзор биогеофизических механизмов взаимодействия состояния климата и растительного покрова. В разделе 6.2 описывается модификация КМ ИФА РАН для учёта радиационного эффекта землепользования и проведённые с нею численные эксперименты. Версия TCCGlob-FocNL была дополнена учётом "маскировки" снега древесной растительностью и возможности одновременного наличия двух растительных биомов в модельной ячейке: естественной растительности и сельскохозяйственных угодий. Альbedo поверхности при этом рассчитывается, исходя из альbedo естественной растительно-

сти и альbedo сельскохозяйственных угодий, взвешиванием по доле ячейки, занятой каждым из этих биомов. Для "маскировки" снега древесной растительностью подобное взвешивание производится, исходя из альbedo снега и альbedo лесов, причём в качестве параметра взвешивания используется параметр $0 \leq k_{alb,snow} \leq 1$. При $k_{alb,snow} = 0$ деревья полностью "маскируют" снег, при $k_{alb,snow} = 1$ "маскировка" снега отсутствует. В данной главе рассматривается лишь первый случай. С КМ ИФА РАН были проведены ансамблевые численные эксперименты для 1500–2100 гг. с заданием площади сельскохозяйственных угодий (как посевных площадей, так и лугов) по среднегодовым данным проекта Land Use Harmonization (LUN), в том числе для XXI века — по расчётам с моделями AIM, IMAGE, MESSAGE и MiniCAM. Кроме того, учитывались также годовые эмиссии углекислого газа за счёт промышленной деятельности, сжигания ископаемого топлива и за счёт землепользования, среднегодовые значения концентрации метана, закиси азота, фреонов и тропосферных сульфатов, а также вариации солнечной постоянной и оптической толщины стратосферных аэрозолей. Для XXI века указанные антропогенные воздействия (за исключением сценариев землепользования) задавались по сценариям SRES B1, A1B и A2. Возможные вариации солнечной постоянной и толщины стратосферных аэрозолей в XXI веке не учитывались. Для сценариев, полученных с использованием каждой из моделей проекта LUN, было проведено три интегрирования КМ ИФА РАН, различающихся между собой начальными условиями.

Раздел 6.3 посвящён результатам этих численных экспериментов. Глобально осреднённое среднегодовое радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы за счёт изменения альbedo при распространении сельскохозяйственных угодий $R_{alb,g}$ не превышает по абсолютной величине 0.02 Вт м^{-2} вплоть до начала XVIII века. Затем $R_{alb,g}$ увеличивается по абсолютной величине, достигая $(-0.05) \text{ Вт м}^{-2}$ к началу XX века и $(-0.11) \text{ Вт м}^{-2}$ — к его концу. В XXI веке глобально $R_{alb,g}$ дополнительно меняется не более чем на 0.03 Вт м^{-2} . РВВ на верхней границе атмосферы из-за землепользования R_{alb} в конце XX века наиболее велико в летнем полушарии (в тропиках — в течение всего года) в регионах наибольшего распространения сельскохозяйственных угодий, где оно может превышать по модулю 6 Вт м^{-2} . В XXI веке оно меняется относительно конца XX века не более чем на несколько десятых Вт м^{-2} .

Отклик глобально осреднённой среднегодовой температуры $T_{a,g}$ на внешнее воздействие не превышает 0.15 К до начала XX века. В XX веке линейный тренд $T_{a,g}$ в численных экспериментах без учёта РВВ из-за землепользования составляет $0.67 \pm 0.11 \text{ К/столетие}$ (здесь и далее в этом абзаце указаны выборочное среднее для коэффициента тренда и соответствующее стандартное отклонение), что близко к верхней границе эмпирической оценки $0.6 \pm 0.2 \text{ К/столетие}$ Четвёртого отчёта МГЭИК. При учёте землепользования линейный тренд $T_{a,g}$ составляет $0.56 \pm 0.08 \text{ К/столетие}$, что хорошо согласуется с эмпирической оценкой Четвёртого отчёта МГЭИК. В XXI веке рост $T_{a,g}$ близок к полученному в главе 4 при соответствующем сценарии

антропогенного воздействия SRES. При заданном сценарии SRES различие изменения глобально осреднённой температуры атмосферы у поверхности между различными сценариями LUN не превышает 0.05 К.

Учёт радиационного эффекта землепользования приводит к тому, что относительно расчётов, учитывающих только другие антропогенные воздействия на климат, потепление уменьшается в средних широтах Евразии и субтропиках Северной Америки, а также в Амазонии и в центральной Африке (рис. 5а, б). Именно в этих регионах отмечается наибольшее расширение сельскохозяйственных площадей в XX веке. При этом потепление усиливается в субтропических широтах Евразии, особенно на востоке Китая, где оно достигает 2 К, тогда как в численных экспериментах SRES оно близко к 1 К. Усиление потепления в этом регионе отмечается как в тёплый, так и в холодный период года и связано с развивающимся в этом регионе нагревающим радиационным возмущающим воздействием из-за замены полупустынной естественной растительности на сельскохозяйственные угодья. Подобное, но менее значимое усиление потепления отмечается также в субтропиках Южной Америки. Следует отметить, что линейный тренд уменьшения T_a в XX веке в субтропиках Северной Америки, в центральной Африке и в Амазонии, а также один из максимумов потепления в субтропиках Евразии выявляется также по данным наблюдений (рис. 3.9а из Четвёртого отчёта МГЭИК). Однако отрицательный тренд температуры атмосферы у поверхности в средних широтах Евразии, проявляющийся в КМ ИФА РАН, по данным наблюдений не выявляется. По-видимому, его возникновение в модели связано с грубостью динамической схемы модели и недостаточным переносом тепла в восточную часть Европы циркуляцией атмосферы.

Кроме того, учёт землепользования существенно улучшает согласие модельных осадков с данными наблюдений, особенно в субтропиках Евразии и Северной Америки, Амазонии и центральной Африке (рис. 5в, г). Общее уменьшение осадков в этих регионах было выявлено также по данным наблюдений (рис. 3.13 и 3.14 из Четвёртого отчёта МГЭИК). Уменьшение осадков в субтропиках Евразии особенно заметно в летний период. В субтропиках Северной Америки, в Амазонии и центральной Африке уменьшение осадков проявляется в течение всего года. В отмеченном выше регионе усиления потепления при учёте радиационного эффекта землепользования, наоборот, в летний период осадки увеличиваются. Возможной причиной такого отклика осадков является изменение атмосферной конвекции вследствие альbedo поверхности из-за соответствующего охлаждения нижней тропосферы. В XXI веке влияние изменения альbedo поверхности суши при землепользовании на изменение температуры и осадков относительно невелико. Исключением является численный эксперимент с КМ ИФА РАН, в котором площадь сельскохозяйственных угодий задана по расчётам с моделью MiniSAM. Для этого численного эксперимента усиление потепления в средних широтах Евразии достигает 1.5 К. Пространственная структура изменения отклика осадков на антропогенное воздействие из-за

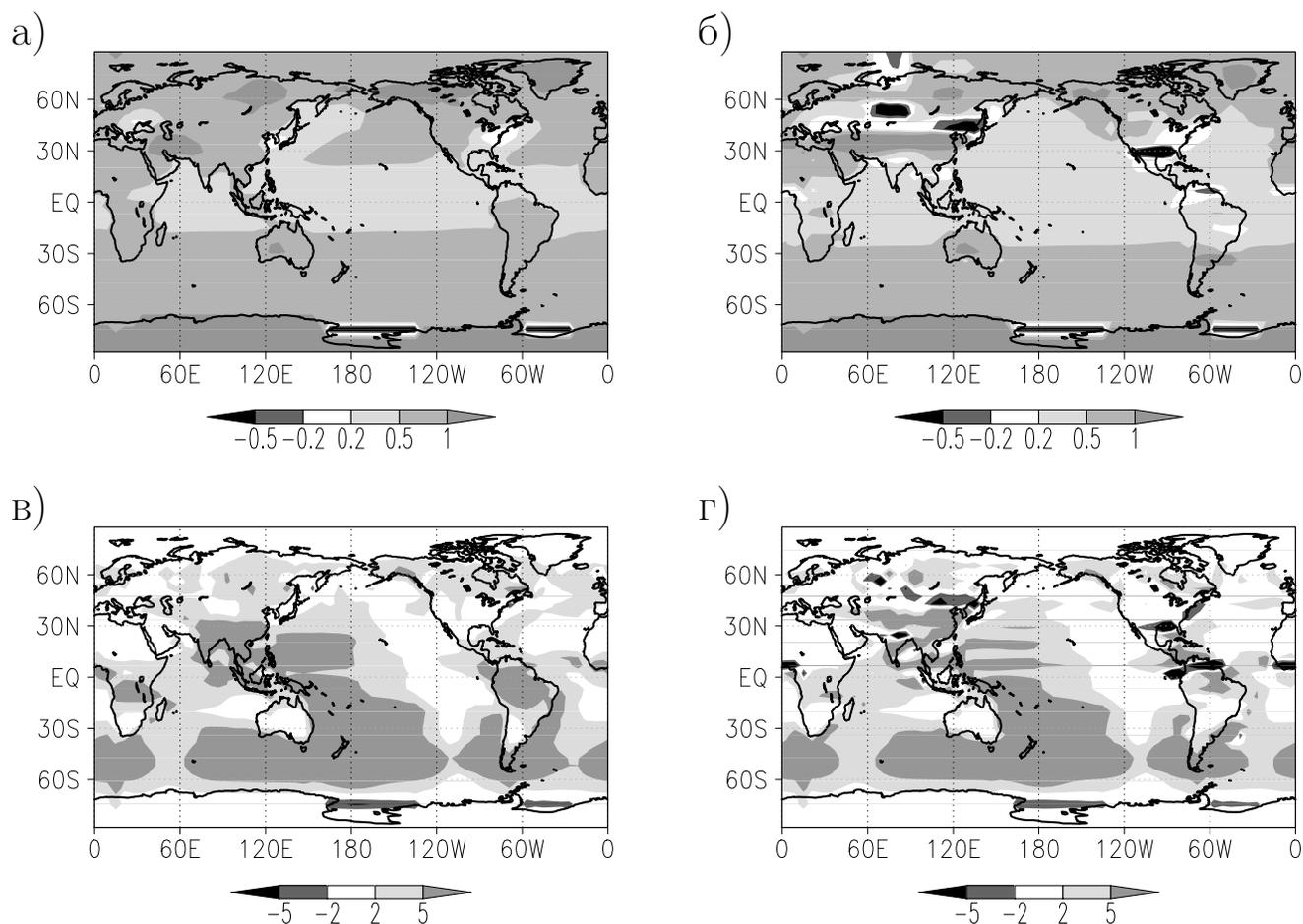


Рис. 5. Линейный тренд температуры атмосферы у поверхности (К/столетие) (а, б) и изменения годовых сумм осадков (см) (в, г) в XX веке в численных экспериментах с учётом только парникового, аэрозольного РВВ и РВВ из-за изменения солнечной постоянной (а, в) и при дополнительном учёте изменения альbedo поверхности суши из-за землепользования (б, г).

радиационного эффекта землепользования в КМ ИФА РАН в целом подобна соответствующей структуре для температуры. При этом такое изменение отклика осадков в КМ ИФА РАН не превышает нескольких миллиметров в месяц.

В разделе 6.4 проводится обсуждение результатов главы 6.

Глава 7 посвящена сравнению климатической эффективности механизмов изменения альbedo поверхности суши при землепользовании. В разделе 7.1 указывается на значительные неопределённости, связанные с заданием альbedo сельскохозяйственных угодий при глобальном моделировании климата. Заметная неопределённость также связана с интенсивностью механизма "маскировки" снега древесной растительностью. В связи с этим с КМ ИФА РАН были поставлены ансамблевые численные эксперименты с систематическим изменением альbedo сельскохозяйственных угодий $\alpha_{s,agro}$ и параметра $k_{alb,snow}$, определяющего интенсивность

"маскировки" снега. Детали их постановки описаны в разделе 7.2.

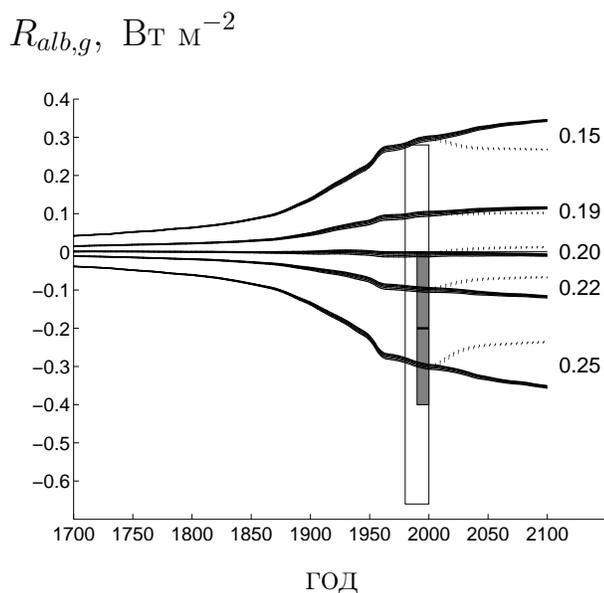


Рис. 6. Глобальное осреднённое по десятилетиям мгновенное радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы за счёт изменения альbedo поверхности при землепользовании в численных экспериментах с КМ ИФА РАН (сценарии изменения площади сельскохозяйственных угодий, полученные по с моделям MESSAGE и MiniCAM, выделены чёрными сплошными и пунктирными линиями соответственно). Показаны группы расчётов с указанными на рисунке значениями $\alpha_{s,agro}$. Различные линии внутри этих групп соответствуют разным значениям параметра $k_{alb,snow}$. Белый прямоугольник соответствует оценке неопределённости $R_{alb,g}$, полученной в [Myhre and Myhre, 2003], серый прямоугольник — подобной оценке, приведённой в Четвёртом отчёте МГЭИК (чёрной линией указана центральная оценка).

Различия между расчётами с КМ ИФА РАН при разных значениях $\alpha_{s,agro}$ проявляются также в XXI веке между двумя сценариями изменения площади сельскохозяйственных угодий. Так, при $\alpha_{s,agro} = 0.20$ в конце XXI века разность $R_{alb,g}$ при сценариях изменения s_{agro} , полученных с моделями MESSAGE и MiniCAM, не превышает 0.02 Вт м^{-2} (рис. 6). Эта разность увеличивается при $\alpha_{s,agro} = 0.15$ до 0.08 Вт м^{-2} , а при $\alpha_{s,agro} = 0.25$ — до 0.13 Вт м^{-2} .

В разделе 7.3 анализируется радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы из-за землепользования в этих численных экспериментах. Его глобальное значение $R_{alb,g}$ при $\alpha_{s,agro} < 0.20$ является нагревающим, при $\alpha_{s,agro} > 0.20$ — охлаждающим (рис. 6). В проведённых в данной работе численных экспериментах в заданный момент времени различия $R_{alb,g}$ определяются, в основном, различием альbedo естественной растительности и сельскохозяйственных угодий. Эффект "маскировки" снега древесной растительностью существенно менее заметен. Так, если собрать численные эксперименты с КМ ИФА РАН в группы с одинаковым значением $\alpha_{s,agro}$, но с разными значениями $k_{alb,snow}$, то глобально осреднённое среднегодовое РВВ из-за землепользования относительно доантропогенного состояния модели в последнее десятилетие XX века между указанными группами меняется от $(-0.28) \text{ Вт м}^{-2}$ до $(+0.27) \text{ Вт м}^{-2}$, тогда как внутри каждой из групп в этот период $R_{alb,g}$ различается не более чем на 0.012 Вт м^{-2} . Физической причиной этого является то, что "маскировка" снега древесной растительностью может осуществляться лишь зимой в регионах умеренных и высоких широт, когда инсоляция относительно мала, так что изменение альbedo не приводит к очень большим изменениям радиационного баланса поверхности.

При $\alpha_{s,agro} = 0.20$ глобально осреднённое среднегодовое РВВ близко к нейтральному. Однако это является следствием взаимной компенсации охлаждающего РВВ R_{alb} в высоких широтах и ряде тропических регионов и нагревающего — в субтропиках и других регионах тропиков. При этом в высоких широтах возникновение $R_{alb} < 0$ связано с эффектом "маскировки" снега, в тропиках — с заменой тропических лесов сельскохозяйственными угодьями.

Вклад эффекта "маскировки" снега древесной растительностью в развитие антропогенного РВВ можно оценить по разности $R_{alb}|_{k_{alb,snow}=0} - R_{alb}|_{k_{alb,snow}=1}$ при заданном $\alpha_{s,agro}$. При этом "маскировка" снега оказывается значимой лишь в небольшом числе регионов, составляя там в конце XX века по абсолютному значению от 1 Вт м⁻² до 3 Вт м⁻².

В разделе 7.4 проводится объективный выбор значений параметров КМ ИФА РАН, связанных с влиянием землепользования на альбедо поверхности. При этом используются критерии, основанные на переменных диаграмм Тэйлора. В качестве массивов данных наблюдений используются среднемесячные данные для приповерхностной температуры атмосферы в XX веке HadCRUT3v и подобные среднегодовые данные GISS. Сравнение проводилось для поля коэффициента линейного тренда среднегодовой температуры в XX веке $\mu_{T_a,ann}$ над сушей. Коэффициент пространственной корреляции r между модельным полем $\mu_{T_a,ann}$ и соответствующим полем, полученным по данным наблюдений, как для массива HadCRUT3v, так и для массива GISS наиболее велик при $\alpha_{s,agro} \geq 0.22$. Соответствующий коэффициент пространственной вариации A наиболее близок к единице при $\alpha_{s,agro} = 0.20 - 0.22$, равняясь 1.3 - 1.4 при использовании данных GISS в качестве эталонных данных и 0.75 - 0.86 при использовании данных HadCRUT3v в качестве таких данных. Таким образом, если вывод о переоценении/недооценивании пространственной неоднородности изменений климата КМ ИФА РАН сделать затруднительно, то всё-таки для обоих массивов данных наилучшее качество воспроизведения моделью достигается при одном и том же значении $\alpha_{s,agro}$ с лишь небольшой зависимостью от $k_{alb,agro}$. Указанное значение альбедо сельскохозяйственных угодий соответствует стандартной версии КМ ИФА РАН.

В разделе 7.5 анализируется температурный отклик в численных экспериментах данной главы. Подобно радиационному возмущающему воздействию, его глобально осреднённое значение существенно сильнее зависит от $\alpha_{s,agro}$, чем от $k_{alb,snow}$. В частности, изменение $T_{a,g}$ к концу XX века относительно доантропогенного состояния в зависимости от $\alpha_{s,agro}$ составляет от 0.76 К до 1.27 К, тогда как различие этого отклика в реализациях с фиксированным значением $\alpha_{s,agro}$ (при разных $k_{alb,snow}$) не превышает 0.02 К. Коэффициент линейного тренда глобальной температуры $T_{a,g}$ в XX веке меняется от 0.47 К/столетие до 0.85 К/столетие. Формально все эти значения, за исключением значений (0.83 - 0.85) К/столетие, полученных при экстремально низком $\alpha_{s,agro} = 0.15$, согласуются с соответствующим интервалом неопределённости (0.6 ± 0.2) К/столетие, полученным по эмпирическим данным. Однако наиболее

близкими к центру этого интервала являются значения, полученные в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при $\alpha_{s,agro} = 0.20$ и $\alpha_{s,agro} = 0.22$. В XXI веке и на глобальном, и на региональном уровне различие изменения T_a между расчётами с различными значениями $\alpha_{s,agro}$ и $k_{alb,snow}$ невелико и близко к полученному в предыдущей главе.

В разделе 7.6 проводится обсуждение результатов главы 7.

Четвёртая часть диссертационной работы посвящена разработке и внедрению в КМ ИФА РАН пространственно–распределённой модели наземного углеродного цикла и анализу региональных особенностей взаимодействия между климатом и углеродным циклом.

Глава 8 посвящена анализу антропогенных воздействий на климатические характеристики суши. Её включение в диссертационную работу необходимо для лучшего понимания результатов глав 9 и 10. В разделе 8.1 описывается модификация КМ ИФА РАН за счёт включения в неё детальной схемы термо– и гидрофизических характеристик почвогрунта, разработанной в ИФА им. А.М. Обухова РАН при непосредственном участии автора и постановка численных экспериментов с этой версией модели. В целом они подобны расчётам главы 6, но не учитывают влияние землепользования на физические характеристики поверхности суши.

Раздел 8.2 посвящён результатам этих численных экспериментов. В середине XXI века среднегодовое потепление поверхности суши относительно 1961–1990 гг. при наиболее агрессивном сценарии воздействия SRES A2 максимально над сушей высоких широт Евразии (от 3 К до 5 К) и Северной Америки (от 4 К до 5 К). В тропиках и средних широтах Южного полушария увеличение температуры скин–слоя почвы (или снега при наличии последнего) T_s составляет от 1 К до 2 К. При менее агрессивных сценариях антропогенного воздействия пространственная структура отклика T_s сохраняется, но абсолютные величины уменьшаются. Так, при сценарии SRES B1 к середине XXI века среднегодовое потепление над сушей достигает 2–3 К в Евразии и 3–5 К в Северной Америке, а в тропиках и средних широтах Южного полушария — не более 1.5 К. К концу XXI века при наименее агрессивном сценарии антропогенного воздействия SRES B1 рост T_s относительно 1961–1990 гг. в средних и высоких широтах суши равен от 3 К до 5 К в Евразии и от 4 К до 7 К в Северной Америке. При наиболее агрессивном сценарии воздействия среднегодовое потепление поверхности почвы к 2100 г. в Евразии составляет 5–8 К, а в Северной Америке — 4–10 К. В тропиках потепление в этот период заметно меньше, чем в более высоких широтах, так что характерное увеличение T_s в 2071–2100 гг. относительно 1961–1990 гг. равно от 1 К до 2 К при сценарии SRES B1 и от 1 К до 3 К при сценарии SRES A2. Во всех случаях потепление зимой вне тропиков сильнее, чем летом.

Изменения длины вегетационного периода τ_{veg} , определённой как длительность части календарного года, когда температура атмосферы у поверхности выше $T_{veg} = 273.15$ К, как правило, не превышают недели в XX век. Существенно большие изменения длительности ве-

гетационного периода отмечаются в расчётах с КМ ИФА РАН в XXI веке. К середине этого столетия различия между расчётами при разных сценариях антропогенного воздействия SRES невелико. При всех трёх сценариях отмечается удлинение на 1–2 мес. вегетационного периода в средних и субполярных широтах Евразии и Северной Америки относительно конца XX века. В небольшом числе регионов увеличение τ_{veg} превышает 2.5 мес. К концу XXI века отмечается дальнейшее увеличение длительности вегетационного периода в КМ ИФА РАН. Если при относительно слабом сценарии антропогенного воздействия SRES B1 в этот период типичные значения роста τ_{veg} относительно конца XX века меняются от месяца до двух, то при наиболее агрессивном сценарии SRES A2 в большом числе регионов Евразии и Северной Америки удлинение вегетационного периода составляет от 2.5 до 3 месяцев.

Влагосодержание верхнего 50–сантиметрового слоя почвы w меняется не очень значительно к середине XXI века (относительно 1961–1990 г.) в анализируемых здесь численных экспериментах. Тем не менее, для суши Северного полушария в июле при всех сценариях антропогенного воздействия проявляются области уменьшения w на юге Сибири, в центральной Азии, на юге Европы и в ряде регионов Северной Америки. При этом рост влагосодержания верхнего слоя почвы отмечается в Прибайкалье, а также на северо–западе и северо–востоке Северной Америки. В тропиках во все сезоны отмечаются рост w на полуострове Индокитай и преобладающая тенденция уменьшения влагосодержания почвы в Амазонии. При дальнейшем развитии антропогенного потепления климата пространственная структура изменения влагосодержания почвы меняется незначительно, но с небольшим увеличением абсолютных величин. При агрессивном сценарии антропогенного воздействия SRES A2. дополнительно отмечаются области роста w летом на севере Европы. Кроме того, для всех сценариев антропогенного воздействия в Прибайкалье отмечаются области не только увеличения, но и уменьшения влагосодержания почвы. Изменения влагосодержания почвы при климатических изменениях отражают соответствующие изменения осадков и эвапотранспирации при климатических изменениях.

В **разделе 8.3** проводится обсуждение результатов главы 8.

В **главе 9** описана разработанная автором диссертации пространственно–распределённая схема расчёта характеристик наземного углеродного цикла и её включение в КМ ИФА РАН. Кроме того, в этой главе проводится анализ неопределённости отклика климата и углеродного цикла на антропогенные воздействия, связанный с неопределённостью будущих сценариев землепользования. В **разделе 9.1** ставятся задачи главы 9. В частности, даже знак изменения площади сельскохозяйственных угодий в XXI веке, различается между сценариями, полученными с разными моделями проекта LUN. В данной главе разброс между результатами расчётов с этими моделями рассматривается как интервал неопределённости изменения площади сельскохозяйственных угодий.

В **разделе 9.2** подробно описывается разработанная модель наземного углеродного цикла.

В ней изменение значений продуктивности наземных экосистем и запасов углерода в разных резервуарах происходит ежегодно. Однако для более адекватного учёта сезонных особенностей климата блок наземного углеродного цикла использует поля входных переменных (температуры атмосферы у поверхности T_a , относительного насыщения почвы влагой w и баланс коротковолновой радиации на поверхности R_{SW}) с учётом их годового хода. В схеме учитываются шесть функциональных типов растительности (ФТР): тропические леса, леса умеренного пояса, тайга, травяная растительность, кустарники и сельскохозяйственные угодья. Модельная ячейка делится на две части, в одной из которых находится естественная растительность (один из первых пяти указанных выше ФТР), в другой — сельскохозяйственные угодья. Динамика массы углерода в растительности вычисляется отдельно в естественной растительности и отдельно — в сельскохозяйственных угодьях. Эволюция запаса углерода в почве дополнительно к этому подразделяется на быстрый и медленный резервуары. В схеме учитываются потери биомассы из-за природных пожаров и вырубки при землепользовании. Последнее позволяет интерактивно рассчитывать прямые эмиссии CO_2 в атмосферу при землепользовании. Указанная схема наземного углеродного цикла внедрена в версию КМ ИФА РАН, описанную в предыдущей главе.

В разделе 9.3 описываются численные эксперименты, анализируемые в данной главе. Их постановка подобна постановке численных экспериментов главы 6. Однако в расчётах данной главы эмиссии CO_2 за счёт землепользования не задавались, а рассчитывались интерактивно в соответствии со сценарием для площади распространения сельскохозяйственных угодий. В главе рассмотрены лишь результаты, полученные при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 с четырьмя вариантами новой версии КМ ИФА РАН: 1) TOT: модель с полным взаимодействием между климатом и углеродным циклом (подобно численным экспериментам TOT главы 1 и расчётам с полными вариантами моделей проекта C^4MIP); 2) NOFERT: вариант модели, в котором не учитывается эффект фертилизации наземной растительности углекислым газом; 3) NOCLIMALL: вариант модели, в которой на вход блока углеродного цикла КМ ИФА РАН подаются не текущие климатические поля, а их доантропогенные климатологии, осреднённые за 50 лет; фертилизация растений углекислым газом при этом учитывается (расчёты с этим вариантом модели подобны расчётам NOCLIM главы 1 и расчётам с вариантами моделей проекта C^4MIP , в которых связь между климатом и углеродным циклом является односторонней); 4) NOCLIMVEG: вариант модели, в котором учитывается фертилизация растений углекислым газом и влияние изменений климата на поглощение углекислого газа океаном; однако на вход блока наземного углеродного цикла КМ ИФА РАН подаётся не текущие климатические поля, а их доантропогенные климатологии, осреднённые за 50 лет. В дальнейшем расчёты с этими вариантами модели обозначаются через $xxx\text{-SRESA2-LU}yyy$, где $xxx = \text{TOT}$, NOFERT , NOCLIMVEG , NOCLIMALL , а $yyy = \text{AIM}$, IMAGE , MESSAGE , MiniCAM . В модель-

ный год, соответствующий астрономическому 1500 г., поле площади сельскохозяйственных угодий в модельной ячейке меняется от нулевого до поля, соответствующего данным проекта LUN. Это позволяет корректно учесть прямые эмиссии CO_2 из-за землепользования не только за формальный период интегрирования модели, но и за весь антропогенный период.

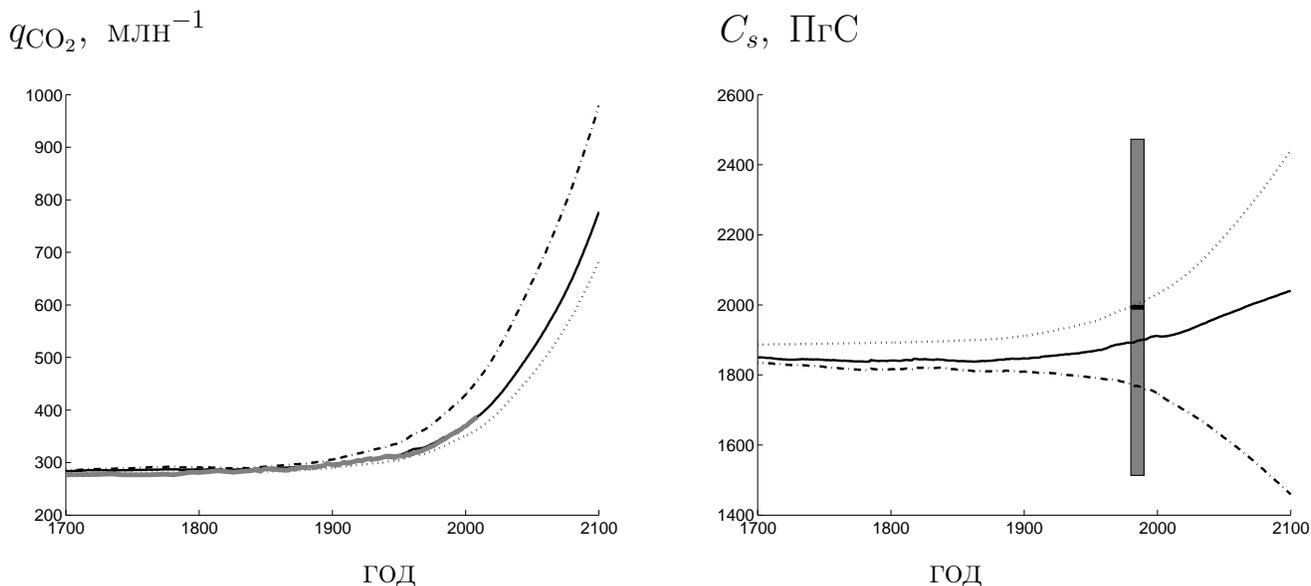


Рис. 7. Концентрация углекислого газа в атмосфере (а) и запас углерода в почве (б) в расчётах с вариантами КМ ИФА РАН TOT, NOFERT и NOCLIMALL (чёрные сплошные, штрихпунктирные и пунктирные линии соответственно) при сценариях антропогенного воздействия SRESA2-LUN MESSAGE. На а) для сравнения показаны данные ледового бурения на станции Лоу-Доум (Антарктида) до 1958 г. и с измерениями q_{CO_2} в обсерватории Мауна-Лоа (Гавайи, США) — начиная с 1958 г. (серая линия). На б) показаны результаты анализа эмпирических данных [Jobbagy and Jackson, 2000] (чёрная линия для центральной оценки и серый прямоугольник для интервала неопределённости).

В разделе 9.4 описаны результаты анализа указанных численных экспериментов. Данная версия КМ ИФА РАН хорошо воспроизводит характеристики климата и углеродного цикла в доиндустриальный период. В XVI–XVIII веках глобально осреднённая среднегодовая температура атмосферы у поверхности $T_{a,g}$ равна 286.7 ± 0.1 К (здесь и далее в этом разделе знак представлены средние по времени и межгодовые стандартные отклонения), а глобальное годовое количество осадков составляет 90.5 ± 0.5 см г^{-1} . Полная первичная продукция наземной растительности в этот период равна 116.6 ± 0.8 ПгС г^{-1} . Глобальная чистая первичная продукция наземной биоты F_{NPP} в XVI–XVIII веках составляет 59.4 ± 0.6 ПгС г^{-1} . Чистая первичная продукция на единицу площади f_{NPP} превышает 1 кгС м^{-2} в тропических лесах, на юго-востоке Азии и в регионе Ближнего Востока/Кавказа. В степях и лесах умеренного пояса f_{NPP} составляет от 0.3 кгС м^{-2} до 0.6 кгС м^{-2} , в бореальных регионах — от 0.1 кгС м^{-2} до 0.3 кгС м^{-2} , а в тундре не превышает 0.1 кгС м^{-2} . Концентрация углекислого газа в ат-

мосфере q_{CO_2} в XVI–XVIII веках в КМ ИФА РАН равна 283.7 ± 1.7 млн⁻¹ (рис. 7а). Запас углерода в наземной растительности в указанный период составляет $C_v = 623 \pm 5$ ПгС. Запас углерода в растительности на единицу площади c_v в доиндустриальный период мал (менее 2 кгС м⁻²) в субполярных широтах. В субтропиках он возрастает до $8 - 10$ кгС м⁻² и достигает $10 - 12$ кгС м⁻² в тропических лесах. Запас углерода в почве доиндустриальный период в КМ ИФА РАН равен $C_s = 1849 \pm 6$ ПгС (рис. 7б). Модельный запас углерода в почве на единицу площади c_s очень мал в пустынях, меняется от 5 кгС м⁻² до 10 кгС м⁻² в тропических регионах, от 20 кгС м⁻² до 30 кгС м⁻² — в регионах степей и умеренных лесов и превышает 30 кгС м⁻² в субполярных регионах.

В численном эксперименте с вариантом модели TOT в XVII–XX веках F_{NPP} увеличивается примерно на треть. Это увеличение F_{NPP} в указанный период в основном связано с фертилизацией наземной растительности ростом содержания углекислого газа в атмосфере, что согласуется с результатами, полученными ранее в главе 1. Несмотря на рост суммарной продуктивности наземных экосистем в XVII–XX веках, запас углерода в наземных экосистемах в расчётах с вариантом TOT КМ ИФА РАН за этот же период уменьшается примерно на четверть. Это уменьшение проявляется в расчётах со всеми вариантами модели и обусловлено заменой естественной растительности сельскохозяйственными угодьями, характеризующимися более быстрым выведением углерода из растений. Запас углерода в почве в варианте модели TOT немного уменьшается в антропогенный период вплоть до конца XIX века, а затем увеличивается на примерно 70 ПгС г.⁻¹ в XX столетии (рис. 7б). Для варианта NOCLIMALL уменьшение C_s вплоть до конца XIX века не проявляется, и запас углерода в почве монотонно возрастает вплоть до конца XX столетия. Увеличение C_s в XVII–XX веках для этого варианта модели составляет около 150 ПгС. Для варианта NOFERT, наоборот, запас углерода в почве уменьшается в этот период. Содержание углекислого газа в атмосфере мало меняется вплоть до первой половины XIX века. Затем оно начинает расти и для варианта TOT достигает 370 млн⁻¹ в 2000 г. (рис. 7б). Это значение очень хорошо согласуется с измерениями на станции Мауна-Лоа. Для варианта NOFERT рост q_{CO_2} сильнее, чем для варианта TOT, и содержание углекислого газа в атмосфере в 2000 г. достигает 429 млн⁻¹. Сравнение этих результатов с результатами интегрирования вариантов модели NOCLIMALL и NOCLIMVEG указывают, что влияние изменений климата на поглощение углекислого газа становится заметным во второй половине XX века. Оно связано с усилением дыхания почвы при потеплении климата. Для двух последних вариантов модели в 2000 г. $q_{\text{CO}_2} = 351$. Суммарные прямые эмиссии углекислого газа в атмосферу за счёт землепользования $E_{\text{CO}_2,lu}$ составляют $55 - 57$ ПгС в 1500–1850 гг. в расчётах со всеми вариантами модели. Дополнительно землепользование приводит к выделению в течение 1850–2000 гг. 155 ПгС (147 ПгС, 167 ПгС) в численном эксперименте с вариантом TOT (NOFERT, NOCLIMVEG/NOCLIMALL). Для варианта TOT глобальное погло-

щение углерода наземными экосистемами $F_{\text{CO}_2,l}$ монотонно увеличивается в XVII–XX веках. Оно достигает 1.9 ПгС г.^{-1} в 1980–х гг. и 2.2 ПгС г.^{-1} — в 1990–х гг. Эти величины находятся внутри соответствующего интервала неопределённости эмпирических оценок, приведённых в Четвёртом отчёте МГЭИК ($1.7_{-1.9}^{+1.7} \text{ ПгС г.}^{-1}$ и $2.6_{-1.7}^{+1.7} \text{ ПгС г.}^{-1}$ соответственно). Суммарное поглощение углерода наземными экосистемами в 1800–1994 гг. (1980–1999 гг.) для варианта модели TOT составляет 134 ПгС (43 ПгС), что также согласуется с эмпирическими оценками.

После вулканических извержений глобальная наземная первичная продуктивность уменьшается из-за общего похолодания климата (на несколько ПгС г.^{-1} после сильнейших извержений). Это согласуется с результатами анализа годовых колец деревьев экосистем разных регионов [Kraakauer, Randerson, 2003], но отличается от результатов измерений в лиственном лесу, расположенном в регионе прохладного климата, проведённых в 1992–2001 гг. [Gu et al., 2003] (после сильного извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.). Следует отметить, однако, что последнее отличие может быть обусловлено особенностями пространственного отклика экосистем на вулканические извержения. Так, в КМ ИФА РАН уменьшение F_{NPP} после вулканических извержений связано с уменьшением f_{NPP} тропических лесов, прежде всего — в центральной Африке, тогда как продуктивность лесов высоких широт при этом возрастает. Несмотря на увеличение F_{NPP} , после вулканических извержений $F_{\text{CO}_2,l}$ заметно возрастает, что согласуется с наблюдениями. Причиной этого служит уменьшение дыхания почвы из-за похолодания климата, наблюдающееся в течение нескольких лет после вулканических извержений. Следует отметить, что схема углеродного цикла КМ ИФА РАН не учитывает различий между прямой и диффузной коротковолновой радиацией. Как следствие, известные данные о перестройке наземного углеродного цикла после вулканических извержений удаётся, по крайней мере, качественно объяснить без привлечения механизмов влияния диффузной радиации на продуктивность растений. Это позволяет указать на потенциальную опасность уменьшения продуктивности растений (в частности, урожайности сельскохозяйственных культур) при часто обсуждаемом в настоящее время подходе к предотвращению глобального потепления, связанному с контролируемым выделением сульфатных аэрозолей в стратосферу.

Для варианта TOT поглощение углерода наземными экосистемами на единицу площади $f_{\text{CO}_2,l}$ положителен (суша поглощает углерод из атмосферы) практически во всех регионах суши в XVII–XX веках. В конце XX века его характерные значения составляют от $0.02 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ до $0.1 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ в тропических лесах и от $0.01 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ до $0.05 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ — в более высоких широтах. Для варианта модели NOFERT, наоборот, в этот период практически везде $f_{\text{CO}_2,l} < 0$ (суша служит источником CO_2 из атмосферы). Для вариантов NOCLIMVEG и NOCLIMALL этот поток снова становится положительным и по абсолютной величине превышает соответствующие значения для варианта TOT.

В XXI веке чистая первичная продукция растений в зависимости от сценария землепользо-

вания возрастает до $110 - 120 \text{ ПгС г.}^{-1}$ для варианта TOT, для других вариантов модели оно заметно меньше. Это указывает на то, что фертилизация растений углекислым газом остаётся важной на протяжении XXI века (при значении параметров схемы, выбранных в данной главе), причём климатические изменения в XXI веке также способствуют росту продуктивности растений. Рост F_{NPP} больше для сценариев, при которых происходит дальнейшее увеличение площади сельскохозяйственных угодий в XXI веке (полученных с моделями IMAGE и MESSAGE), чем для сценария, полученного с моделью MiniCAM, в котором площадь распространения сельскохозяйственных угодий в XXI веке уменьшается. Для всех вариантов КМ ИФА РАН в большинстве регионов чистая первичная продукция растений на единицу площади f_{NPP} возрастает на протяжении XXI века. Для варианта TOT этот рост проявляется везде, за исключением регионов пустынь. Землепользование наиболее значимо влияет на f_{NPP} в тропиках.

Запас углерода в растительности в расчётах с вариантом TOT в XXI веке возрастает до примерно 700 ПгС . Этот рост во многом связан с фертилизацией растительности ростом содержания углекислого газа в атмосфере. Увеличение C_v наиболее заметно при сценарии SRESA2-LUN MiniCAM. Пространственная структура изменения запаса углерода в растительности на единицу площади c_v близка к пространственной структуре изменений суммарной первичной продуктивности растений.

Изменения глобального запаса углерода в почве в XXI веке сильно различаются между вариантами модели. В частности, в зависимости от сценария землепользования C_s возрастает до $1994 - 2038 \text{ ПгС}$ в расчётах с вариантом TOT, до $2416 - 2468 \text{ ПгС}$ — с вариантами NOCLIMALL и NOCLIMVEG, но уменьшается до $1453 - 1561 \text{ ПгС}$ при интегрировании варианта NOFERT (рис. 7б).

Концентрация углекислого газа в атмосфере к концу XXI века при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 в расчётах с вариантом TOT КМ ИФА РАН увеличивается до $752 - 763 \text{ млн}^{-1}$ в зависимости от сценария землепользования LUN (рис. 7а).

Для варианта TOT интенсивность поглощения углерода наземными экосистемами увеличивается вплоть до 2060-х гг., достигая в это десятилетие $3.8 - 3.9 \text{ ПгС г.}^{-1}$. После этого она начинает уменьшаться и в конце XXI века равняется $3.4 - 3.5 \text{ ПгС г.}^{-1}$. В расчётах с вариантами NOCLIMALL и NOCLIMVEG $F_{\text{CO}_2,l}$ почти монотонно растёт на протяжении всего срока интегрирования модели и в конце XXI века достигает в зависимости от сценария землепользования от 7.1 ПгС г.^{-1} до 7.4 ПгС г.^{-1} . В расчётах с вариантом NOFERT наземные экосистемы и в XXI веке служат источником углерода в атмосферу (а не стоком из неё), и $F_{\text{CO}_2,l}$ в конце XXI столетия составляет от 3.2 ПгС г.^{-1} до 3.4 ПгС г.^{-1} в зависимости от сценария землепользования. Пространственное распределение интенсивности поглощения углерода наземными экосистемами на единицу площади поверхности не сильно зависит от сценария

землепользования в XXI веке.

Поглощение углекислого газа океаном в КМ ИФА РАН продолжает увеличиваться на протяжении XXI века. В 2090–2100 гг. для варианта TOT (NOFERT, NOCLIMVEG/NOCLIMALL) в зависимости от сценария землепользования оно составляет от 9.7 ПгС г.⁻¹ до 9.9 ПгС г.⁻¹ (от 13.7 ПгС г.⁻¹ до 13.9 ПгС г.⁻¹, от 8.5 ПгС г.⁻¹ до 8.8 ПгС г.⁻¹).

Таким образом, несмотря на большое различие (до примерно 70 ПгС) между результатами расчётов при различных сценариях землепользования в терминах запасов углерода в почве и в наземной растительности, соответствующее различие концентрации углекислого газа в атмосфере мало и не превышает 10 млн⁻¹.

Сравнение g_{CO_2} между различными вариантами модели, используемыми в данной главе, показывает, что КМ ИФА РАН, подобно другим климатическим моделям, характеризуется положительной обратной связью между климатом и углеродным циклом. Для версии КМ ИФА РАН, используемой в данной главе, коэффициент усиления обратной связи между климатом и углеродным циклом g_{CO_2} в конце XXI века близок к 0.19. Более 90% интенсивности этой обратной связи обусловлено динамикой наземного углеродного цикла.

Положительная обратная связь между климатом и углеродным циклом в КМ ИФА РАН приводит к усилению глобального потепления климата в XXI веке на примерно 0.2 К, т.е. около 9% потепления, характерного для КМ ИФА РАН при сценарии антропогенного воздействия SRES A2. Подобно g_{CO_2} (см. 1, 2), коэффициент усиления обратной связи между климатом и углеродным циклом может быть определён в терминах глобально осреднённой среднегодовой температуры атмосферы у поверхности

$$g_{GSAT} = (f_{GSAT} - 1) / f_{GSAT},$$

где

$$f_{GSAT} = \Delta T_{a,g}^{TOT} / \Delta T_{a,g}^{NOCLIMALL}.$$

Для КМ ИФА РАН g_{GSAT} в конце XXI века близок к 0.09. Меньшая величина g_{GSAT} по сравнению со значением g_{CO_2} является следствием логарифмической зависимости РВВ углекислого газа в атмосфере от его концентрации. Это согласуется с результатами глав 1 и 2.

В **разделе 9.5** проводится обсуждение результатов главы 9.

Целью **главы 10** является оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты. В **разделе 10.1** ставится соответствующая задача. В **разделе 10.2** описываются численные эксперименты с КМ ИФА РАН, проведённые для её решения. Их длительность и использованные при расчётах сценарии внешнего воздействия идентичны соответственно длительности и сценариям, использованным в предыдущей главе. Однако в данной главе используются три сценария SRES B1, A1B и A2, а для сценариев площади распространения сельскохозяйственных угодий

используются только сценарии, полученные в рамках проекта LUN с моделями MESSAGE и MiniCAM. Различные интегрирования внутри этих ансамблей были построены изменением двух параметров наземного углеродного цикла: постоянной полунасыщения $q_{1/2}$, определяющей зависимость полной первичной продукции наземной растительности от q_{CO_2} , в интервале от 150 млн^{-1} до 450 млн^{-1} (всего были использовано пять значений этой переменной) и коэффициента $k_{s,agro/nat}$, описывающего влияние культивации на дыхание почвы, в диапазоне от 1.0 до 1.4 (также пять значений). Таким образом, для каждого сценария SRES и каждого сценария землепользования LUN было произведено $N_{mem} = 5 \times 5 = 25$ интегрирований КМ ИФА РАН, различающихся между собой значениями параметров $q_{1/2}$ и $k_{s,agro/nat}$. Границы интервалов изменения этих двух переменных были выбраны, исходя либо из экспериментальных значений, либо из значений, характерных для современных глобальных климатических моделей с углеродным циклом. Анализ степени реалистичности отдельных членов построенных ансамблевых численных экспериментов проводился с использованием байесовой статистики (см. раздел 3.3). При этом в качестве массива эталонных данных D использовались оценки потоков углекислого газа из атмосферы в океан и наземные экосистемы для 1980–х и 1990–х гг. и изменения концентрации углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} в 1958–2004 гг. по наблюдениям в обсерватории Мауна Лоа (Гавайи, США). Для всех переменных в качестве априорной функции распределения вероятности были выбраны нормальные распределения. При байесовом осреднении сценарии землепользования, полученные с моделями MESSAGE и MiniCAM, считались равновероятными друг другу.

В разделе 10.3 анализируется степень реалистичности отдельных членов ансамблевого численного эксперимента. Наибольшими значениями байесовых весов характеризуются расчёты с парами $(q_{1/2}, k_{s,agro/nat})$, равными $(150 \text{ млн}^{-1}, 1.1)$, $(200 \text{ млн}^{-1}, 1.2)$, $(300 \text{ млн}^{-1}, 1.3)$ соответственно. Последняя пара значений параметров использовалась в версии КМ ИФА РАН, использованной в предыдущей главе. В целом модель воспроизводит наблюдаемые характеристики углеродного цикла либо при одновременно относительно низком значении обоих параметров $q_{1/2}$ и $k_{s,agro/nat}$, либо при одновременно относительно больших их значениях. Физически это соответствует взаимной компенсации изменения чистой первичной продукции наземных экосистем (регулируемых постоянной полунасыщения, входящей в закон Михаэлиса–Ментен) и гетеротрофного дыхания почвы (зависящего от $k_{s,agro/nat}$). Изменение характеристик углекислого газа в атмосфере и величина потепления климата заметно изменяется даже между тремя реализациями с наибольшими байесовыми весами. Так, в этих реализациях концентрация углекислого газа при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 (A1B, B1) к концу XI века достигает значений от 765 млн^{-1} до 844 млн^{-1} (от 635 млн^{-1} до 699 млн^{-1} , от 508 млн^{-1} до 551 млн^{-1}), глобальное потепление к 2071–2100 гг. относительно 1961–1990 гг. составляет от 2.7 К до 3.0 К (от 2.3 К до 2.6 К, от 1.7 К до 1.9 К). Большие значения из этих

интервалов соответствуют реализациям с меньшей постоянной полунасыщения $q_{1/2}$.

В разделе 10.4 анализируются ансамблевые характеристики изменений климата и углеродного цикла в XXI веке. В построенных ансамблевых численных экспериментах концентрация углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} к середине XXI века возрастает до 546 ± 16 млн⁻¹ при сценариях SRES A1B и A2 и до 502 ± 12 млн⁻¹ — при сценарии SRES B1 (рис. 8; здесь и далее знаком "±" разделены байесовы ансамблевое среднее и внутриансамблевое стандартное отклонение). К концу XXI века q_{CO_2} увеличивается до 773 ± 28 млн⁻¹ при сценарии SRES A2, до 662 ± 24 млн⁻¹ при сценарии SRES A1B и до 534 ± 16 млн⁻¹ при сценарии SRES B1. Эти изменения в целом согласуются с результатами расчётов с другими современными моделями с углеродным циклом, в том числе моделью ансамбля C⁴MIP, моделью общей циркуляции ИВМ РАН и моделями промежуточной сложности CLIMBER-2 и UVic ESCM.

Глобальное потепление в 2071–2100 гг. относительно 1961–1990 гг. при сценарии SRES A2 (SRES A1B, SRES B1) составляет 3.19 ± 0.09 К (2.52 ± 0.08 К, 1.84 ± 0.06 К). В среднем по ансамблю над сушей внетропических широт среднегодовое потепление за этот период равно 5 – 8 К при сценарии SRES A2, 4 – 6 К при сценарии SRES A1B и 3 – 4 К при сценарии SRES B1 (рис. 9а, б). Над сушей тропиков соответствующее потепление меньше: 1 – 3 К при сценариях SRES A2 и A1B и 0.5 – 2 К при сценарии SRES B1. Для температуры атмосферы у поверхности T_a внутриансамблевое стандартные отклонение $\sigma(T_a|D)$ слабо зависит от выбранного сценария антропогенного воздействия. Его значения меняются от 0.2 К до 0.5 К над сушей внетропических широт, от 0.1 К до 0.4 К над сушей тропиков и не превышают 0.2 К над большинством океанических регионов (кроме Арктики; рис. 9в). Для всех трёх сценариев антропогенного воздействия на климат указанные значения изменения глобальной температуры находятся внутри интервалов неопределённости, получаемых для климатических моделей Четвёртого отчёта МГЭИК.

q_{CO_2} , млн⁻¹

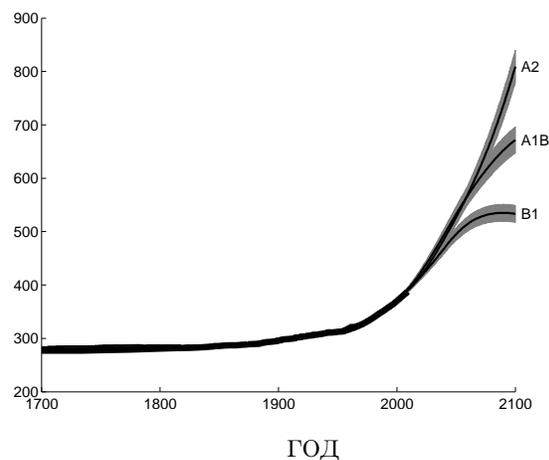


Рис. 8. Изменение концентрации углекислого газа в атмосфере в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Для каждого из сценариев SRES (указанных на рисунке) представлены байесовы средние по ансамблям значения (тонкие чёрные линии) и интервал неопределённости, характеризуемый байесовым внутриансамблевым стандартным отклонением (область, заштрихованная серым цветом). Жирной чёрной кривой представлены данные наблюдений, проведённых в обсерватории Мауна-Лоа.

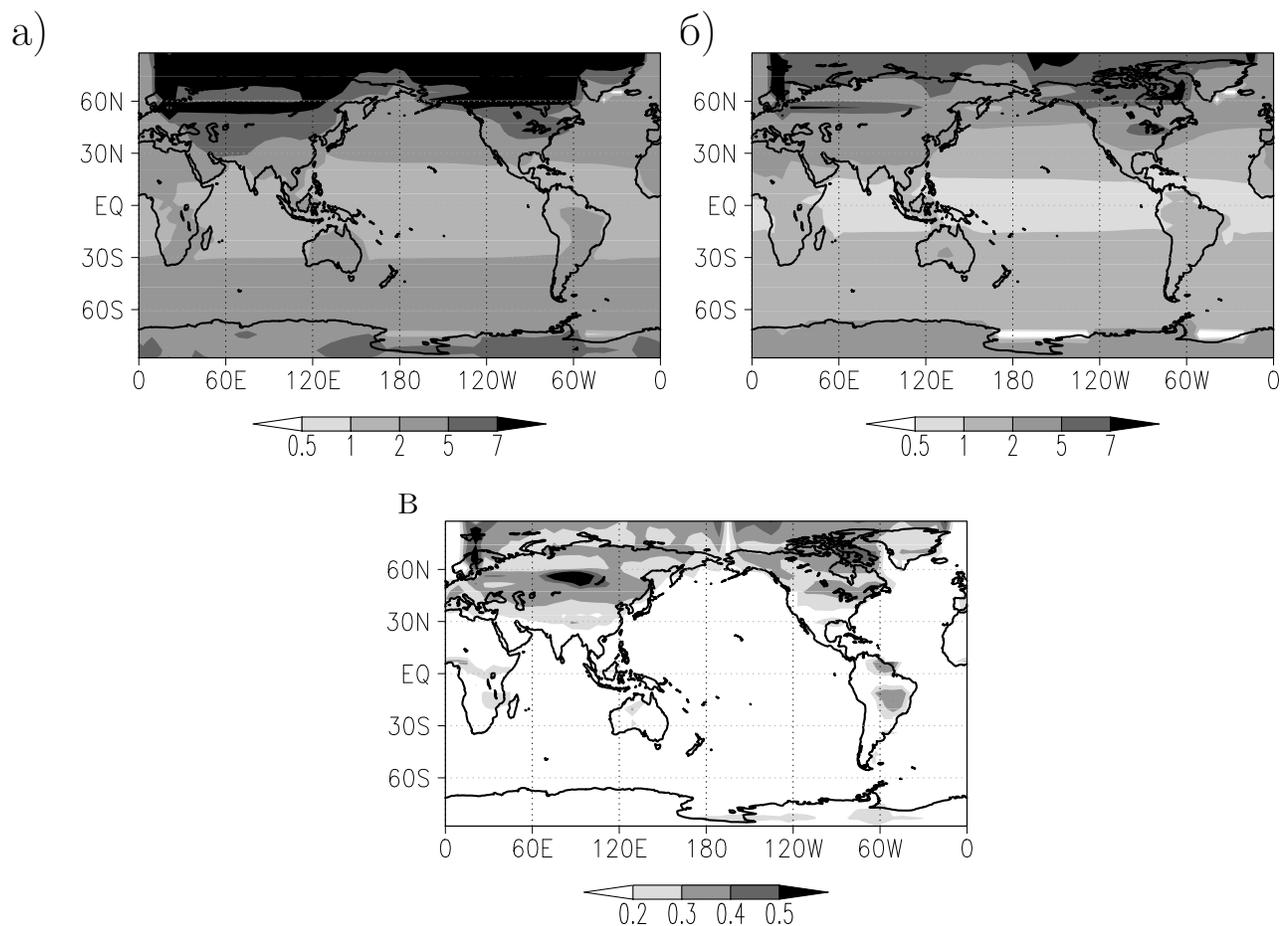


Рис. 9. Байесово среднее значение изменения среднегодовой температуры атмосферы у поверхности (кельвины) в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН между периодами 1961–1900 гг. и 2071–2100 гг. при сценариях антропогенного воздействия SRES A2 (а) и SRES B1 (б), а также байесово внутриансамблевое стандартное отклонение этого изменения, осреднённое по трём сценариям SRES A2, A1B и B1 (в).

Для глобальной чистой первичной продуктивности наземных экосистем и глобальных запасов углерода в почве и растительности интервалы неопределённости при разных сценариях антропогенного воздействия (SRES B1, A1B и A2) перекрываются между собой на протяжении всего интегрирования модели. Значение первой из этих переменных при сценарии антропогенного воздействия от 74 ± 1 ПгС г.⁻¹ в 1961–1990 гг. до 102 ± 13 ПгС г.⁻¹ в конце XXI века. Запас углерода в растительности меняется соответственно от 511 ± 8 ПгС до 646 ± 70 ПгС, а запас углерода в почве — соответственно от 1916 ± 20 ПгС до 1970 ± 65 ПгС. Пространственные структуры изменений этих переменных также слабо зависят от сценария антропогенного воздействия. Увеличение f_{NPP} устойчиво по ансамблю (в качестве критерия этого в работе взято двукратное превышение модуля изменения байесового ансамблевого среднего над байесовым внутриансамблевым стандартным отклонением) отмечается во всех регионах, за исключением пустынь с типичными значениями изменения от 0.1 кгС м.⁻² г.⁻¹ до 0.5 кгС м.⁻² г.⁻¹. Увеличение содержания углерода в наземной растительности на единицу площади c_v происходит устойчиво по ансамблю возрастает в средних и субполярных широтах Евразии и Северной Америки, где в ряде регионов рост среднего по ансамблю значения c_v составляет $1 - 10$ кгС м.⁻² г.⁻¹. В большинстве регионов также отмечается устойчиво по ансамблю проявляющееся накопление углерода почвой тропиков и субтропиков (с характерными значениями -0.5 кгС м.⁻² г.⁻¹ до -5 кгС м.⁻² г.⁻¹) и сложной структурой изменения c_s в более высоких широтах.

В среднем по ансамблю глобальное поглощение углерода наземными экосистемами $F_{CO_2,l}$ возрастает в первой половине XXI века, достигая $2.0 - 2.5$ ПгС г.⁻¹ в зависимости от сценария SRES с байесовым внутриансамблевым стандартным отклонением, меняющимся в зависимости от сценария от 0.7 ПгС г.⁻¹ до 1.0 ПгС г.⁻¹ (рис. 10). Затем $F_{CO_2,l}$ уменьшается, достигая в последние десятилетия XXI века 1.7 ± 1.4 ПгС г.⁻¹ при сценарии SRES A2, 1.4 ± 0.7 ПгС г.⁻¹ при сценарии SRES A1B и 0.6 ± 0.3 ПгС г.⁻¹ при сценарии SRES B1. В среднем по ансамблю

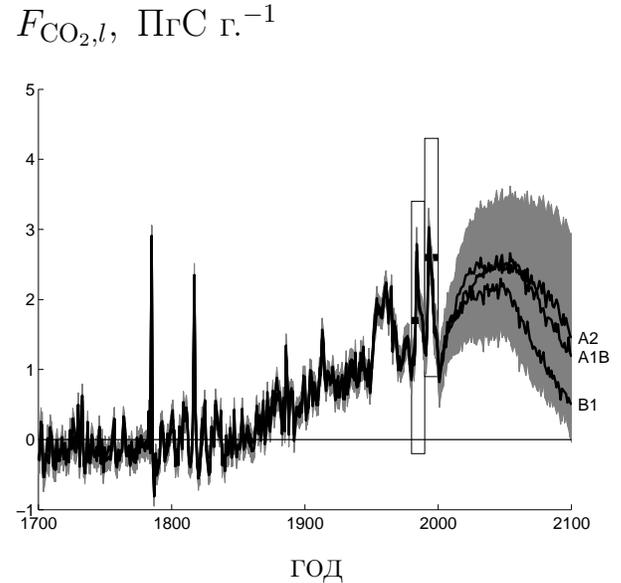


Рис. 10. Поглощение углерода наземными экосистемами в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Обозначения для результатов модельных расчётов идентичны использованным на рис. 8. Также приведены соответствующие эмпирические оценки Четвёртого отчёта МГЭИК для 1980–х и 1990–х гг. (центральная оценка обозначена жирной горизонтальной линией, интервал неопределённости — белыми прямоугольниками).

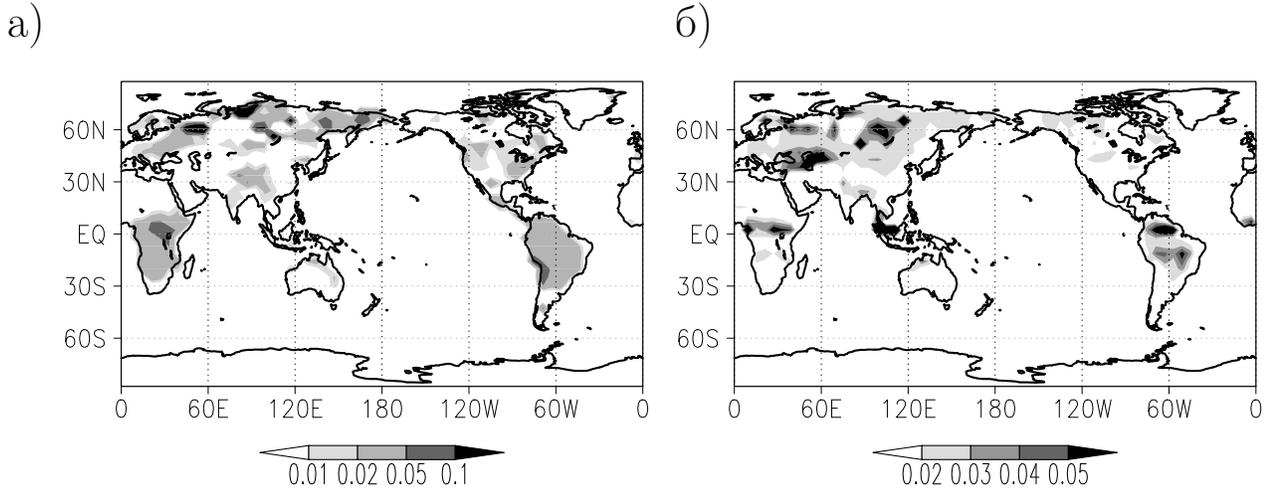


Рис. 11. Байесово среднее значение поглощения углерода наземными экосистемами ($\text{кгС м}^{-2} \text{г.}^{-1}$) в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН между периодами 1961–1900 гг. и 2071–2100 гг. (а), а также байесово внутриансамблевое стандартное отклонение этой переменной (в) при сценарии антропогенного воздействия SRES A2. Два использованных сценария землепользования семейства LUN при байесовом осреднении считались равновероятными.

в 2071–2100 гг. заметное поглощение углерода наземными экосистемами на единицу площади $f_{\text{CO}_2,t}$ отмечается в регионах распространения лесных экосистем, где его характерные значения меняются от $0.01 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ до $0.2 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$ (рис. 11а). При этом для всех трёх сценариев $E(f_{\text{CO}_2,t}|D)$ наиболее велико во внетропических широтах Евразии. Сравнимые с этим величины $E(f_{\text{CO}_2,t}|D)$ для тропических лесов и для экосистем Северной Америки отмечены лишь при сценариях SRES A1B и A2, тогда как для сценария SRES B1 в конце XXI века в этих регионах $E(f_{\text{CO}_2,t}|D) \leq 0.01 \text{ кгС м}^{-2} \text{ г.}^{-1}$. Более того, в этих регионах при всех трёх сценариях $E(f_{\text{CO}_2,t}|D)$ сравнимо с $\sigma(f_{\text{CO}_2,t}|D)$, тогда как для внетропических экосистем Евразии, особенно для таёжных регионов, отношение $E(f_{\text{CO}_2,t}|D)/\sigma(f_{\text{CO}_2,t}|D)$ заметно превышает единицу (рис. 11б).

Таким образом, в терминах биопродуктивности и накопления углерода в наземных экосистемах сценарии SRES статистически неразличимы между собой.

В **разделе 10.5** проводится обсуждение результатов главы 10.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработана среднегодовая модель наземного углеродного цикла, пригодная к использованию в климатических моделях различных классов. Модель основана на современной формулировке растительности через её функциональные типы. Модель реалистично воспроизводит основные особенности наземного углеродного цикла, известные по реконструкциям для доиндустриального состояния и наблюдениям и реконструкциям для XX

века.

2. Разработана глобально осреднённая модель углеродного цикла, которую можно использовать в упрощённых климатических моделях.
3. Выявлены характерные временные периоды, различающиеся между собой относительным вкладом процессов накопления CO_2 в атмосфере при антропогенных эмиссиях и климатический отклик на него. В начальный период таких эмиссий обратная связь между климатом и углеродным циклом не играет заметной роли. При этом накопление CO_2 в атмосфере практически полностью определяется его антропогенными эмиссиями и прямыми эффектами влияния изменения концентрации углекислого газа на его поглощение из атмосферы наземными экосистемами и океаном. В земной климатической системе этот период продолжался с начала антропогенного периода вплоть до середины XX века. Во второй половине XX века становится заметной обратная связь между климатом и углеродным циклом, интенсивность которой увеличивается со временем. Согласно модельным расчётам, в XXI веке следует ожидать дальнейшего роста коэффициента усиления этой обратной связи. При сохранении современного темпа роста эмиссий углекислого газа в атмосферу это усиление продолжится несколько столетий. После этого коэффициент усиления обратной связи между климатом и углеродным циклом начинает уменьшаться, асимптотически стремясь к единице. Последнее названо эффектом транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом.
4. Показано, что физической причиной транзитивного насыщения обратной связи между климатом и углеродным циклом (см. вывод 3) является логарифмическая зависимость радиационного возмущающего воздействия углекислого газа от его концентрации в атмосфере q_{CO_2} . Как следствие, при росте q_{CO_2} вклад дополнительного (связанного со взаимодействием между климатом и углеродным циклом) радиационного возмущающего воздействия углекислого газа в общий радиационный форсинг уменьшается.
5. Показано, что взаимодействие климата и углеродного цикла (без учёта геохимических циклов других элементов) при заданном сценарии антропогенных эмиссий CO_2 увеличивает глобальное потепление в XXI веке на $\approx 10\%$.
6. В ансамблевом численном эксперименте с климатической моделью показано, что изменения характеристик климата и углеродного цикла, наблюдавшиеся в XX веке, хотя и полезны для калибровки климатических моделей с углеродным циклом, всё-таки недостаточны для ограничения интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом. При этом неопределённость возникает даже в знаке этой обратной связи,

хотя положительные значения её интенсивности более вероятны, чем отрицательные. В частности, при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 интервал неопределённости интенсивности обратной связи между климатом и углеродным циклом к концу XXI века достигает (59 ± 98) млн⁻¹ в терминах концентрации углекислого газа в атмосфере и (0.4 ± 0.7) Вт м⁻² — в терминах радиационного возмущающего воздействия.

7. Проведены и проанализированы численные эксперименты с версией климатической модели, включающей в себя интерактивный блок эмиссий метана болотными экосистемами $E_{\text{CH}_4,bs}$ и уравнение для концентрации метана в атмосфере. При этом получено, что увеличение $E_{\text{CH}_4,bs}$ к концу XXI века составляет от четверти до половины их современного значения. Это приводит к дополнительному росту содержания метана в атмосфере на 10–20% (относительно расчётов с моделью, где рост этих эмиссий не учитывается) в зависимости от сценария антропогенного воздействия и момента времени. Однако связанные с этим увеличение мгновенного парникового радиационного возмущающего воздействия атмосферного метана и повышение средней приповерхностной температуры воздуха невелики (глобально не более 0.1 Вт м⁻² и 0.05 К соответственно). Это указывает на относительную слабость обратной связи между климатом и метановым циклом.
8. В расчётах с климатической моделью получено, что изменение альbedo поверхности при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями приводит к развитию охлаждающего радиационного возмущающего воздействия в большинстве регионов, кроме регионов естественной полупустынной растительности. Глобально осреднённое среднегодовое значение этого воздействия в конце XX века в оценено величиной -0.11 Вт м⁻². Учёт радиационного эффекта землепользования приводит к заметному улучшению согласия модельных расчётов в исторический период с данными наблюдений. В частности, он важен для воспроизведения среднегодового похолодания и уменьшения осадков в субтропиках Евразии и Северной Америки, в Амазонии и в центральной Африке, а также для формирования локального максимума среднегодового и летнего потепления на востоке Китая. Возможной причиной уменьшения осадков при изменении альbedo при землепользовании является подавление конвективной активности в атмосфере в тёплый период (в тропиках — в течение всего года) и соответствующее уменьшение конвективных осадков.
9. В ансамблевых численных экспериментах с климатической моделью при задании, наряду с другими антропогенными воздействиями на климат, реалистичных сценариев землепользования получено, что наибольшее влияние на глобально осреднённое среднегодовое радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы при землеполь-

зовании оказывает изменение альбедо поверхности при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями. Влияние "маскировки" снега на это возмущающее воздействие существенно меньше, т.к. "маскировка" снега древесной растительностью может осуществляться лишь зимой в регионах умеренных и высоких широт, где инсоляция относительно мала. При широком интервале изменения значений параметров модели, определяющих величину изменения альбедо поверхности при землепользовании, неопределённость отклика модели, связанная с неопределённостью значений таких управляющих параметров в XXI веке не превышает 0.1 К.

10. В численных экспериментах с климатической моделью при задании сценариев антропогенного воздействия оценены изменения в XXI веке для климатических переменных, важных для взаимодействия климата и экосистем. В частности, общее потепление климата сопровождается удлинением вегетационного периода в средних и высоких широтах суши Северного полушария. Характерные значения увеличения длительности вегетационного периода во второй половине XXI века относительно конца XX столетия составляют от месяца до двух, а при наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия SRES A2 в большом числе регионов превышают 2.5 мес. Влагосодержание деятельного слоя почвы меняется незначительно в XXI веке. Тем не менее, проявляются области как увеличения, так и уменьшения запаса влаги в почве с ростом значения этой переменной летом на полуострове Индокитай, на севере Европы и в субполярных регионах Северной Америки и уменьшением — на юге Сибири, на юге Европы и в Амазонии.
11. В численных экспериментах с климатической моделью с углеродным циклом при задании сценариев изменения площади сельскохозяйственных угодий по семейству сценариев, полученным в рамках проекта LUN (Land Use Harmonization), а других антропогенных воздействий — по сценарию SRES A2, проанализирована неопределённость будущих изменений характеристик климата и состояния экосистем, связанная с неопределённостью будущих сценариев землепользования. При этом получено, что различия в сценариях землепользования приводят к заметным различиям характеристик состояния наземных экосистем в XXI веке. Тем не менее, соответствующая неопределённость содержания углекислого газа в атмосфере оказывается очень малой (в XXI веке — не более 10 млн^{-1}).
12. В ансамблевых численных экспериментах при задании сценариев антропогенного воздействия на климат в XXI веке получено, что для глобальных величин основных характеристик наземного углеродного цикла сценарии семейства SRES статистически неразличимы между собой. В большинстве регионов устойчиво по ансамблю в XXI веке проявляется увеличение чистой продукции наземной растительности (особенно вне тропиков) и на-

копление углерода в этой растительности, а также изменение запаса углерода в почве (с общим накоплением углерода в почве тропиков и субтропиков и регионами как накопления, так и потерь углерода почвы в более высоких широтах). В XXI веке устойчиво по ансамблю CO₂ из атмосферы поглощается лишь лесными экосистемами. Однако существенное различие антропогенных эмиссий между сценариями SRES в XXI веке приводит к статистически значимому между этими сценариями различию поглощения углекислого газа океаном, содержания углекислого газа в атмосфере и изменения температуры атмосферы у поверхности. В частности, в 2071–2100 гг. при сценарии SRES A2 (A1B, B1) концентрация углекислого газа в атмосфере к 2100 г. достигает значения 773 ± 28 млн⁻¹ (662 ± 24 млн⁻¹, 534 ± 16 млн⁻¹), а среднегодовое потепление в 2071–2100 гг. относительно 1961–1990 гг. при этом составляет 3.19 ± 0.09 К (2.52 ± 0.08 К, 1.84 ± 0.06 К).

Список публикаций А.В. Елисеева по теме диссертации в рецензируемых изданиях

- [1] Елисеев А.В. Оценка неопределенности будущих изменений концентрации углекислого газа в атмосфере и радиационного форсинга CO₂ // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 301–310.
- [2] Елисеев А.В. Сравнение климатической эффективности механизмов изменения альбедо поверхности суши при землепользовании // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. [в печати].
- [3] Елисеев А.В. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. [в печати].
- [4] Елисеев А.В., Мохов И.И., Петухов В.К. Моделирование квазидвухлетней цикличности температуры атмосферы и тенденций её эволюции при климатических изменениях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 733–742.
- [5] Елисеев А.В., Мохов И.И., Вакалюк Н.Ю. Тенденции изменения фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры суши северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 16–26.
- [6] 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.

- [7] Елисеев А.В., Мохов И.И., Гусева М.С. Чувствительность амплитудно–фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры к изменению среднегодовой температуры: Сравнение данных реанализа и результатов расчётов с климатическими моделями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 326–340.
- [8] Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Взаимодействие климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели климата промежуточной степени сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 3–17.
- [9] Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Влияние учёта прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 591–601.
- [10] 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.
- [11] Eliseev A.V., Mokhov I.I. Eventual saturation of the climate–carbon cycle feedback studied with a conceptual model // Ecol. Mod. 2008. V. 213. № 1. P. 127–132.
- [12] Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
- [13] 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.
- [14] Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф. и др. Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с использованием климатической модели ИФА РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 291–304.
- [15] Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на климат XVI–XXI веков: оценки с использованием КМ ИФА РАН // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIII. Израэль Ю.А., Семёнов С.М., Абакумов В.А. и др. (ред.). М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН 2010. С. 39–66.

- [16] Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 232–244.
- [17] Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосферу: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчетам с КМ ИФА РАН // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 521–526.
- [18] Eliseev A.V., Chernokulsky A.V., Karpenko A.A. et al. Global warming mitigation by sulphur loading in the stratosphere: Dependence of required emissions on allowable residual warming rate // Theor. Appl. Climatol. 2010. V. 101. № 1-2. P. 67–81.
- [19] Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние учёта радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI–XXI веков // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. [принята к публикации].
- [20] Елисеев А.В., Мохов И.И., Мурышев К.Е. Оценки изменений климата XX–XXI веков с использованием версии климатической модели ИФА РАН, включающей в себя модель общей циркуляции океана // Метеорология и гидрология. [принята к публикации].
- [21] Eliseev A.V., Mokhov I.I. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // Adv. Atmos. Sci. 2010. [submitted].
- [22] Мохов И.И., Елисеев А.В. Тенденции изменения характеристик годового хода температуры тропосферы и стратосферы // Изв. АН, Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 4. С. 452–463.
- [23] Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V. et al. The IAP RAS Global Climate Model. Moscow: Dialogue–MSU. 1998. 110 p.
- [24] 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.
- [25] 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 учётом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.

- [26] Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады АН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
- [27] 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.
- [28] Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады АН. 2006. Т. 407. № 3. С. 400–404.
- [29] 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 АН. 2007. Т. 417. № 2. С. 258–262.
- [30] Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др. Воспроизведение характеристик почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 591–610.
- [31] Mokhov I.I., Eliseev A.V Explaining the eventual transient saturation of climate–carbon cycle feedback // Carbon Balance Management. 2008. V. 3. № 4. .
- [32] 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 // Climate Change Reseach Trends. Peretz L.N. (ed.). Hauppauge, NY: Nova Sci. Publ. 2008. P. 217–241.
- [33] Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка изменений эмиссии метана болотными экосистемами Северной Евразии в XXI веке с использованием результатов расчётов с региональной моделью климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 55–62.