

На правах рукописи



Мурышев Кирилл Евгеньевич

**ВЗАИМНОЕ ЗАПАЗДЫВАНИЕ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ
ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ**

Специальность 25.00.29 —
«Физика атмосферы и гидросферы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Елисеев Алексей Викторович

Официальные оппоненты: **Семенов Сергей Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
научный руководитель
ФГБУ «Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А. Израэля»

Грицун Андрей Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора
ФГБУН «Институт вычислительной математики
им. Г.И. Марчука Российской академии наук»

Ведущая организация: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им.
А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 19 ноября 2020 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 при Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д.3.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д.3, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.096.01.

Автореферат разослан « » октября 2020 года.

Телефон для справок: +7 (495) 951 55 65.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.096.01,

канд. физ.-мат. наук

Чернокульский Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Определение роли естественных и антропогенных факторов современных изменений климата – одна из основных проблем современной науки. Согласно данным наблюдений, глобальная приповерхностная температура T в земной климатической системе (ЗКС) повышалась в течение последнего столетия. Потепление в 1880-2012 гг. составило в среднем 0.85 К с интервалом неопределенности 0.65-1.06 К, а в 1951-2012 гг. — 0.72 К с интервалом неопределенности 0.49-0.89 К (см. Пятый оценочный отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата). В соответствии с общепринятыми представлениями, основной причиной происходящего потепления является антропогенный парниковый эффект, дополняемый, а иногда компенсируемый антропогенным воздействием иной природы, а также естественными воздействиями на климат и внутренней изменчивостью ЗКС. Это подтверждается данными эмпирических моделей и глобальных климатических моделей.

Тем не менее, существуют альтернативные гипотезы относительно природы наблюдаемого потепления. В соответствии с ними, основной вклад в его формирование вносят естественные (неантропогенные) факторы. Одним из широко используемых аргументов в поддержку этих гипотез является взаимное запаздывание между изменениями T и содержания углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} , восстанавливаемых по антарктическим ледовым кернам, согласно которым в период окончания оледенений изменения q_{CO_2} в целом отстают от соответствующих изменений T на несколько столетий. Кроме того, на основании данных измерений для второй половины XX – начала XXI вв. и реконструкций для малого ледникового периода XIV-XVIII веков было показано, что межгодовые изменения q_{CO_2} также запаздывают относительно соответствующих изменений T . Все эти результаты используются в качестве аргументов, опровергающих представления о ведущей роли антропогенного парникового эффекта в происходящих изменениях климата.

Указанные аргументы критиковались с различных точек зрения, однако представление о том, что запаздывание между изменениями климатических переменных является надежным индикатором причинно-следственных связей в ЗКС, в рамках этой критики зачастую не подвергалось сомнению. Лишь отдельными авторами отмечалось, что в сложных нелинейных системах, к числу которых относится климатическая система, изменения «опережающей переменной» с физической точки зрения могут быть откликом на изменения «запаздывающей». Это говорит о невозможности в общем случае определить характер причинно-следственной связи между двумя переменными по

взаимному запаздыванию между их изменениями без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия.

В связи с этим является актуальным исследование того, как при различных типах воздействий на климат причинно-следственные связи между изменениями глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере сказываются на их взаимном запаздывании.

Цели и задачи исследования

Основной **целью** исследования является анализ взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры T и содержания углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} . Для достижения поставленной цели в ходе исследования решаются следующие **задачи**:

- анализ взаимного запаздывания между изменениями T и q_{CO_2} в исторический период 1700-2100 гг. по расчетам с моделями ЗКС.
- анализ взаимного запаздывания между изменениями T и q_{CO_2} , полученных в расчетах с моделями при идеализированных внешних воздействиях на ЗКС различной природы (эмиссии парниковых газов в атмосферу и непарниковое радиационное возмущающее воздействие), с различными временными масштабами (от десятков до тысяч лет), периодических и непериодических.

Методы исследования

Анализируются временные ряды для T и q_{CO_2} , полученные в численных экспериментах с климатическими моделями различного класса: моделью общей циркуляции (MIROC-ESM), моделью промежуточной сложности (климатическая модель ИФА РАН) и концептуальной энергобалансовой моделью климата с углеродным циклом. Взаимное запаздывание Δ_{Tq} между изменениями T и q_{CO_2} определяется по максимуму коэффициента корреляции со сдвигом по времени между рядами T и q_{CO_2} . Для получения аналитических решений и качественного объяснения полученных результатов используются упрощенные (в том числе линеаризованные) версии концептуальной модели. В дальнейшем для определенности считается, что $\Delta_{Tq} > 0$, если T опережает q_{CO_2} , и $\Delta_{Tq} < 0$, если T запаздывает относительно q_{CO_2} .

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Современные климатические модели способны воспроизводить запаздывание q_{CO_2} относительно T при условиях, справедливых для доиндустриального голоцена. Поэтому подобное запаздывание не противоречит представлениям о значимости антропогенного вклада в современные климатические изменения.
2. Знак взаимного запаздывания Δ_{Tq} между изменениями T и q_{CO_2} зависит от типа внешнего воздействия. Парниковое воздействие приводит к опережению q_{CO_2}

относительно T , непарниковое воздействие приводит к опережению T относительно q_{CO_2} , если временной масштаб P внешнего воздействия достаточно мал.

3. Знак ΔT_q зависит также от временного масштаба P внешнего воздействия (парникового или непарникового) и временных масштабов процессов в ЗКС. При изменении P и прочих равных условиях ΔT_q может менять знак.
4. Нелинейность климатической системы не является необходимой для смены знака ΔT_q при изменении временного масштаба внешнего воздействия P .
5. При непарниковом радиационном форсинге смена знака ΔT_q при изменении P связана с влиянием запаса углерода почвы на выделение из нее CO_2 при увеличении T . При больших значениях P это приводит к опережению изменений q_{CO_2} относительно вызывающих их изменений T .
6. При эмиссиях CO_2 и CH_4 в атмосферу смена знака ΔT_q при изменении P обусловлена различием времен отклика атмосферных концентраций этих газов на внешнее воздействие. Это приводит к «расфазировке» между изменениями q_{CO_2} и изменениями суммарного радиационного возмущающего воздействия (РВВ) двух этих газов. При большом значении P запаздывание q_{CO_2} относительно суммарного РВВ превосходит соответствующее запаздывание T , благодаря чему изменения T опережают изменения q_{CO_2} , являющиеся основной причиной их возникновения.

Научная новизна

1. Показано, что взаимное запаздывание между температурой и содержанием CO_2 в атмосфере не противоречит представлениям о значимости антропогенного вклада в современные климатические изменения.
2. Впервые показано, что знак взаимного запаздывания между изменениями T и q_{CO_2} зависит от типа внешнего воздействия на ЗКС и его временного масштаба.
3. Впервые продемонстрированы конкретные механизмы климатических изменений, при реализации которых в случае непарникового внешнего воздействия изменения q_{CO_2} опережают по фазе вызывающие их изменения T , а в случае парникового внешнего воздействия изменения T опережают по фазе изменения q_{CO_2} , являющиеся основной причиной их возникновения.
4. Впервые изменения «опережающей переменной» как отклик на изменения «запаздывающей» были получены в линейной модели климатической системы.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты свидетельствуют о невозможности в общем случае определить характер причинно-следственной связи между двумя коррелируемыми

переменными по взаимному запаздыванию между их изменениями без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия.

Представления о механизмах формирования взаимного запаздывания между изменениями климатических переменных, полученные в рамках данной работы, могут быть использованы для уточнения интерпретации данных наблюдений и палеореконструкций.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на заседании бюро ОНЗ РАН, заседании совета по климату РАН, а также на российских и международных конференциях, школах, семинарах, в том числе на семинарах Лаборатории теории климата и Отдела исследования климатических процессов ИФА им. А.М. Обухова РАН, семинаре НИВЦ МГУ «Суперкомпьютерное моделирование климатической системы» (2016), семинаре отдела климатологии Института географии РАН (2016), семинаре ИГКЭ (2016), семинаре ААНИИ (2016), семинаре Потсдамского института исследования климатических воздействий (2016), Международной конференции «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» им. А.М. Обухова (Москва, 2018), 12-й Международной конференции «Физика атмосферы, Климат и Окружающая среда» (Нанкин, Китай, 2017), четвёртой международной конференции по проблемам моделирования земной системы 4ICESM (Гамбург, 2017), XXII и XXV Международных симпозиумах "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2016; Новосибирск, 2019), международной конференции "ГеоСибирь-2016" (Новосибирск, 2016), Международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Туапсе, 2015 г.; Майкоп, 2018 г.), международной конференции молодых ученых «Изменения климата и природной среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (Кисловодск, 2014 г.).

Личный вклад автора

Автор принимал участие во всех этапах работы, включая постановку задач, анализ и интерпретацию полученных результатов. Все основные результаты, вынесенные на защиту, получены автором лично.

Структура диссертации определена поставленными задачами и порядком их решения. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объём диссертации составляет 90 страниц, в том числе 14 рисунков, 2 таблицы. Список литературы содержит 82 названия.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, перечислены основные результаты и этапы исследования.

Первая глава диссертации посвящена описанию методологии исследования и моделей взаимодействия между климатом и углеродным циклом, используемых в данной работе, а также изложению некоторых иллюстративных результатов.

В **разделе 1.1** описана климатическая модель (КМ) ИФА РАН, относящаяся к классу моделей промежуточной сложности. Модель включает модули атмосферы, океана, деятельного слоя суши, углеродного и метанового циклов. В наземной части блока углеродного цикла решается уравнение сохранения массы для среднегодового запаса углерода в наземной растительности и почве. В качестве граничных условий выступают осредненные по сезонам метеорологические переменные и среднегодовое содержание углекислого газа в атмосфере. Распределение растительности предписано с учетом ее подсеточной неоднородности. Океанический углеродный цикл представлен глобально-осредненной моделью типа Бакастоу, модифицированной с учетом температурных зависимостей констант химических реакций.

Для метана в атмосфере используется приближение хорошо перемешанного газа, подчиняющегося балансовому уравнению

$$\frac{dq_{CH_4}}{dt} = \frac{E_{CH_4}}{\beta} - \frac{q_{CH_4}}{\tau_{tot}}, \quad (1)$$

где q_{CH_4} – содержание метана в атмосфере [млрд⁻¹], E_{CH_4} – суммарные (естественные и антропогенные) эмиссии метана в атмосферу [МтCH₄/год], $\beta = 2.75$ МтCH₄/млрд⁻¹. Для τ_{tot} используется соотношение

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_{atm}} + \frac{1}{\tau_{soil}}, \quad (2)$$

где $\tau_{soil} = 150$ лет – характерное время разложения метана в почве, а τ_{atm} – время жизни метана в атмосфере, зависящее от температуры.

Поскольку разрушение метана в атмосфере в результате цепочки химических превращений приводит к образованию углекислого газа, в правой части уравнения для q_{CO_2} (для которого в КМ ИФА РАН также используется приближение хорошо перемешанного в атмосфере газа) возникает дополнительное слагаемое, зависящее от q_{CH_4} . Это уравнение имеет следующий вид:

$$c_0 \frac{dq_{CO_2}}{dt} = E_{CO_2} + F_{land} + F_{oc} + \mu \frac{q_{CH_4}}{\tau_{tot}}, \quad (3)$$

где q_{CO_2} – концентрация углекислого газа в атмосфере [млн^{-1}], $c_0 = 2.123 \text{ ГтС/млн } (\text{CO}_2)^{-1}$, E_{CO_2} – внешние (напр., антропогенные) эмиссии CO_2 в атмосферу, F_{oc} и F_{land} – потоки углерода в атмосферу из океана и наземных экосистем, нелинейно зависящие от T , q_{CO_2} и содержания углерода в указанных резервуарах, $\mu = 0.27 \cdot 10^{-3} \text{ ГтС/млрд}(\text{CH}_4)^{-1}$.

Антропогенные эмиссии метана задаются как граничные условия. Естественные эмиссии этого газа представляются в виде суммы эмиссий из почвы, которые вычисляются интерактивно, и прочих эмиссий естественного происхождения, которым приписывается постоянное значение $65 \text{ МтCH}_4/\text{год}$.

В разделе 1.2 описана концептуальная модель климата с углеродным циклом. Она состоит из уравнений, характеризующих отклонения среднеглобальных значений температуры T и содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере от их равновесных значений. Первое уравнение описывает тепловой баланс ЗКС:

$$C \frac{dT}{dt} = R_{tot} - \lambda_0 (T - T^{(0)}), \quad (4)$$

Где $T^{(0)} = 13.7 \text{ }^\circ\text{C}$ – базовое значение T , $C = 10^9 \text{ Дж м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ – теплоемкость единицы площади земной поверхности, примерно соответствующая теплоемкости слоя океана глубиной 350 м, R_{tot} – суммарное радиационное возмущающее воздействие (РВВ), слагаемое $\lambda_0(T - T^{(0)})$ характеризует все климатические обратные связи в линейном виде (в частности, сюда входит зависимость влажности атмосферы от температуры). Коэффициент λ_0 называют параметром чувствительности климата. Значение λ_0 находится в диапазоне от 0.6 до $1.6 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$. В стандартной версии концептуальной модели $\lambda_0 = 1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$.

В данной работе рассматриваются три типа внешнего воздействия на ЗКС: парниковый эффект CO_2 , парниковый эффект CH_4 и непарниковые радиационные возмущающие воздействия (обусловленные, например, изменениями солнечной постоянной, вулканическими извержениями и др). В соответствии с этим суммарное радиационное возмущающее воздействие R_{tot} можно условно разделить на три слагаемых:

$$R_{tot} = R_{CO_2} + R_{CH_4} + R_{NonGHG} \quad (5)$$

Парниковое РВВ CO_2 описывается в виде

$$R_{CO_2} = R_0 \ln \left(\frac{q_{CO_2}}{q_{CO_2}^{(0)}} \right), \quad (6)$$

где $q_{CO_2}^{(0)} = 278 \text{ млн}^{-1}$ – доиндустриальное значение содержания CO_2 в атмосфере, R_0 – нормировочный коэффициент. Для современных климатических моделей $R_0 = 5.3 \text{ Вт/м}^2$.

Радиационное возмущающее воздействие метана рассчитывается в приближении «эффективного CO_2 ».

Содержание метана в атмосфере и его естественные эмиссии рассчитываются аналогично тому, как это делается в КМ ИФА РАН. Схема расчета изменений q_{CO_2} также аналогична той, что используется в КМ ИФА РАН.

В ряде экспериментов использованы версии КМ ИФА РАН и концептуальной модели, не включающие блоков метанового цикла. При этом содержание метана в атмосфере задается в виде функции от времени.

В разделе 1.3 описана линеаризованная версия концептуальной модели, используемая в дальнейшем для получения аналитических решений.

В частности, показано, что поток CO_2 из океана в атмосферу F_{oc} в линейном приближении не зависит от изменений температуры. В свою очередь поток углерода между атмосферой и поверхностью суши F_{land} зависит от температуры и в линейном приближении.

В разделе 1.4 анализируются результаты численных экспериментов по воспроизведению климата XVIII-XXI вв., поставленных с моделью MIROC-ESM, КМ ИФА РАН и концептуальной моделью.

Эксперименты были проведены при внешнем воздействии, задаваемом в соответствии с условиями проекта CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5) для 1700-2100 гг., в том числе при использовании сценария RCP 2.6 (Representative Concentration Pathway 2.6) для 2006-2100 гг.

Получено, что в период со слабыми внешними эмиссиями CO_2 в атмосферу и сильным воздействием естественного происхождения (доиндустриальный голоцен) изменения q_{CO_2} запаздывают относительно изменений T . В XXI веке, где при сценарии RCP 2.6 содержание CO_2 в атмосфере достигает максимума, а затем уменьшается, наоборот, T запаздывает относительно q_{CO_2} (см. рис. 1, табл. 1).

Вычисленные с использованием кросс-корреляционной функции между T и q_{CO_2} значения Δ_{Tq} , полученные в экспериментах с моделями MIROC-ESM и КМ ИФА РАН для периодов 1800-1849 и 2006-2100, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Взаимное запаздывание Δ_{Tq} (годы) между изменениями глобальной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q_{CO_2} , полученные по результатам расчетов с моделями MIROC-ESM и КМ ИФА РАН.

Период	MIROC-ESM	КМ ИФА РАН
1800-1849 гг.	8	4
2006-2100 гг.	-15	-8

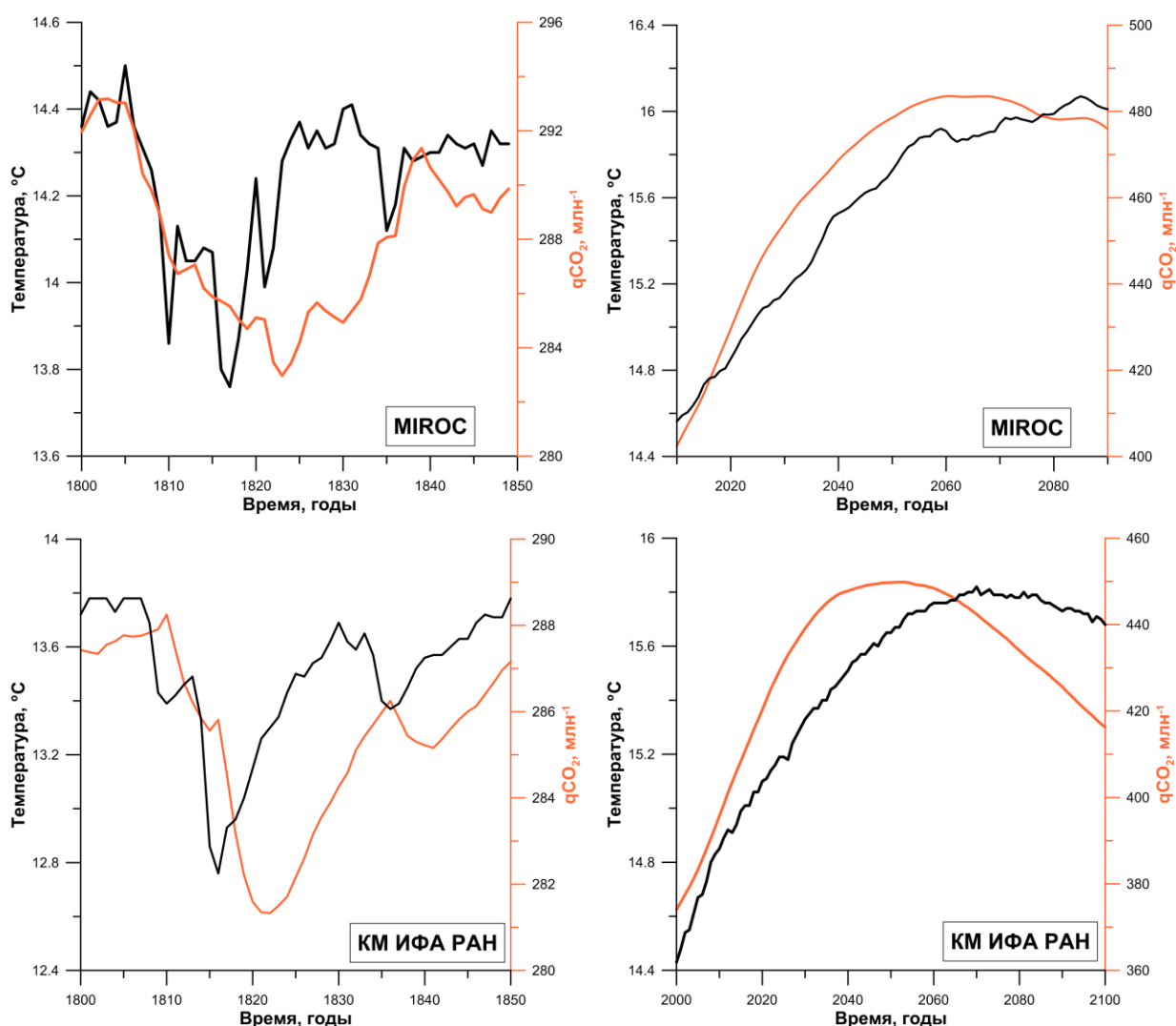


Рис. 1. Изменения T и q_{CO_2} в экспериментах с климатическими моделями MIROC и ИФА РАН, поставленных при внешнем воздействии, задаваемом в соответствии с условиями проекта CMIP5 ('historic' + RCP 2.6). Ряды T и q_{CO_2} , полученные по модели MIROC для XXI века, сглажены с шириной окна 10 лет.

Полученные результаты иллюстрируют зависимость знака взаимного запаздывания между q_{CO_2} и T от типа внешнего воздействия на ЗКС. Этот вывод также обосновывается с использованием линейризованной и упрощенной версии концептуальной модели.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при сценариях непарникового внешнего воздействия на ЗКС.

В разделе 2.1 описаны идеализированные численные эксперименты с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью¹, поставленные при нулевых антропогенных эмиссиях парниковых газов в атмосферу и отличном от нуля непарниковом радиационном возмущающем воздействии (НПРВВ). В качестве примера такого воздействия выбрано

¹ В этой главе используются версии КМ ИФА РАН и концептуальной модели, не включающие блоков метанового цикла.

изменение значения солнечной постоянной. Использовались как периодические, так и непериодические НПРВВ с временными масштабами от десятков до тысяч лет. Наряду с запаздыванием Δ_{Tq} между изменениями T_g и q_{CO_2} , анализировалось также запаздывание Δ_{Rq} между внешним воздействием R_{NonGHG} и q_{CO_2} , для знака которого используется соглашение, подобное используемому для Δ_{Tq} (см. выше).

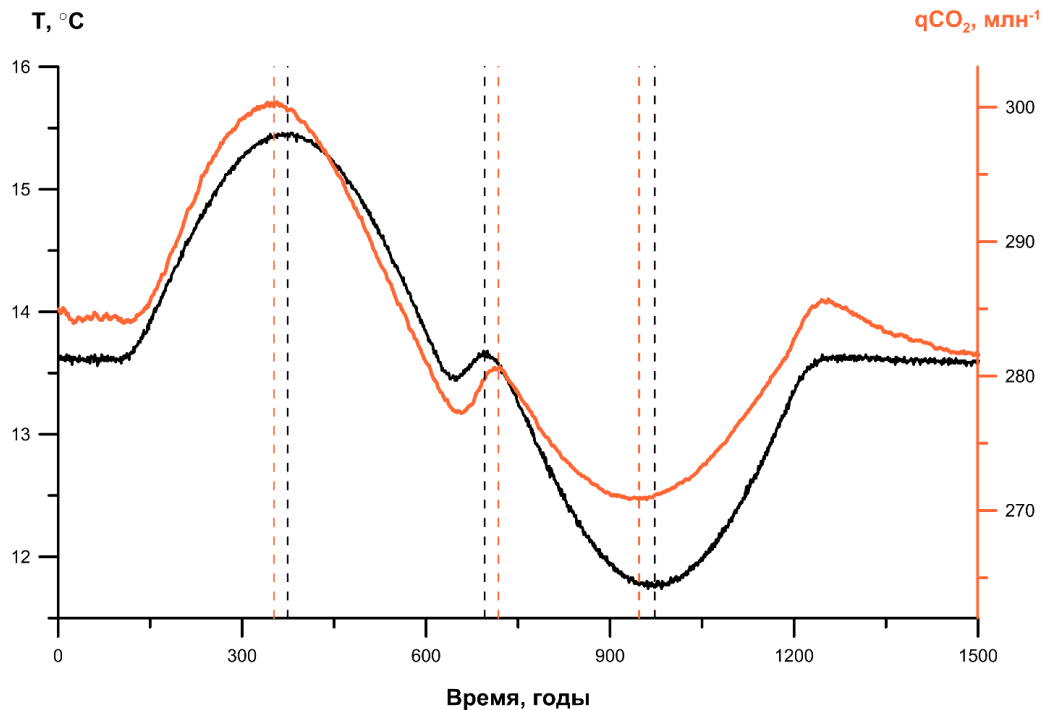


Рис. 2. Зависимость от времени изменений глобальной температуры T (черная кривая) и содержания CO_2 в атмосфере q_{CO_2} (оранжевая кривая) в идеализированном численном эксперименте с КМ ИФА РАН. Пунктирными линиями отмечены моменты времени, когда T и q_{CO_2} достигают локальных экстремумов.

Получено, что как при периодическом, так и при непериодическом НПРВВ изменения T могут как отставать по фазе от изменений q_{CO_2} , так и опережать их в зависимости от временного масштаба НПРВВ. При быстро меняющемся НПРВВ (с временным масштабом порядка 10^1 - 10^2 лет) изменения T опережают изменения q_{CO_2} , при медленно меняющемся НПРВВ (с временным масштабом порядка 10^3 лет и более) изменения q_{CO_2} опережают вызывающие их изменения T (рис. 2). Запаздывание изменений q_{CO_2} относительно вызывающего их внешнего воздействия R_{NonGHG} также сменяется опережением при увеличении временного масштаба воздействия со столетнего до тысячелетнего. Таким образом, при непериодическом внешнем воздействии на ЗКС знак взаимного запаздывания Δ_{Tq} между изменениями T и q_{CO_2} , а также запаздывания Δ_{Rq} между внешним воздействием R_{NonGHG} и q_{CO_2} зависит от временного масштаба этого воздействия.

В разделе 2.2. уравнения концептуальной модели исследованы аналитически. При этом запаздывание Δ_{Tq} определялось по фазовому сдвигу между переменными. Получено,

что зависимость знака запаздываний Δ_{Tq} и Δ_{Rq} от временного масштаба внешнего воздействия проявляется в ее линеаризованной и упрощенной версии. В частности, это означает, что для возникновения обсуждаемого эффекта нелинейность климатической системы не является необходимой. В простейшей версии модели, где проявляется смена знаков запаздываний Δ_{Tq} и Δ_{Rq} при увеличении временного масштаба внешнего воздействия P , потоки углерода в атмосферу из океана и наземных экосистем выглядят следующим образом:

$$F_{oc} = -\beta(q_{CO_2} - q_{CO_2}^{(0)}),$$

$$F_{land} = \alpha(M - M^{(0)}) + \gamma(T - T^{(0)}),$$

где M – содержание углерода в почве; $M^{(0)}$ – его начальное значение; α , β , γ – коэффициенты, возникающие при линеаризации уравнений концептуальной модели.

При этом взаимное запаздывание Δ_{Tq} может менять знак при изменении P как в случае периодического, так и в случае непериодического внешнего воздействия. Если внешнее воздействие задано в виде $R_{NonGHG} = R_A \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right)$, можно получить аналитическое выражение для временного масштаба P_{Tq}^* , при котором взаимное запаздывание Δ_{Tq} меняет знак:

$$P_{Tq}^* = \frac{2\pi}{\sqrt{\alpha\beta}}$$

При $P < P_{Tq}^*$ изменения q_{CO_2} отстают по фазе от изменений T , тогда как при $P > P_{Tq}^*$ изменения q_{CO_2} опережают по фазе вызывающие их изменения T .

Выражение для критического временного масштаба P_{Rq}^* , при котором меняет знак запаздывание Δ_{Rq} , имеет следующий вид:

$$P_{Rq}^* = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha + \beta + \lambda}{\alpha\beta\lambda}}$$

Здесь $\lambda = \frac{\lambda_0}{C}$. При $P < P_{Rq}^*$ изменения q_{CO_2} запаздывают относительно R_{NonGHG} , при $P > P_{Rq}^*$ изменения q_{CO_2} опережают по фазе вызывающее их внешнее воздействие R_{NonGHG} .

В разделе 2.3 дается качественное объяснение описанному выше эффекту. Фактически, необходимо объяснить, почему при большом временном масштабе НПРВВ q_{CO_2} достигает максимума и начинает убывать раньше, чем T .

При отсутствии внешних эмиссий CO_2 в атмосферу убывание или возрастание q_{CO_2} определяется знаком суммы потоков F_{land} и F_{oc} (положительные значения обоих потоков

соответствуют притоку CO_2 к атмосфере). При $F_{\text{land}} + F_{\text{oc}} > 0$ q_{CO_2} возрастает, при $F_{\text{land}} + F_{\text{oc}} < 0$ он убывает. В простейшем случае можно считать, что поток F_{land} зависит только от температуры T и содержания углерода в наземных экосистемах M : $F_{\text{land}} = F_{\text{land}}(M, T)$, причем $\frac{\partial F_{\text{land}}}{\partial T} > 0$, $\frac{\partial F_{\text{land}}}{\partial M} > 0$.

Увеличение T сначала приводит к интенсификации дыхания наземных экосистем (преимущественно гетеротрофного), что влечет за собой увеличение потока F_{land} и рост содержания CO_2 в атмосфере q_{CO_2} . Запасы углерода в наземных экосистемах при этом уменьшаются², то есть $\frac{dM}{dt} < 0$. Когда аномалия M становится достаточно большой по абсолютной величине, возрастание потока F_{land} сменяется убыванием. В этот момент скорость изменения потока F_{land} равна нулю:

$$\frac{dF_{\text{land}}}{dt} = \frac{\partial F_{\text{land}}}{\partial M} \frac{dM}{dt} + \frac{\partial F_{\text{land}}}{\partial T} \frac{dT}{dt} = 0$$

Из этого следует, что в момент, когда поток F_{land} начинает убывать, $\frac{dT}{dt} > 0$. Таким образом, поток F_{land} начинает убывать раньше, чем начинает убывать T . Если после начала убывания F_{land} температура возрастает достаточно медленно, чтобы ее прирост не препятствовал убыванию F_{land} , и достаточно долго, чтобы F_{land} успел уменьшиться достаточно сильно, в какой-то момент сумма $F_{\text{land}} + F_{\text{oc}}$ становится отрицательной, поскольку отрицательным является поток F_{oc} (океан поглощает добавочный CO_2 , выделенный в атмосферу экосистемами суши). В этот момент содержание CO_2 в атмосфере начинает убывать, хотя температура продолжает расти.

При малых временных масштабах внешнего воздействия данный эффект не проявляется потому, что температура растет недостаточно медленно и недостаточно долго, и до момента, когда она достигает максимума и начинает убывать, не успевает сформироваться достаточно большая отрицательная аномалия содержания углерода в наземных экосистемах. По этой причине на этапе роста температуры поглощение CO_2 океаном из атмосферы не компенсирует выделения этого газа в атмосферу из наземных экосистем, и содержание CO_2 в атмосфере начинает убывать уже после того, как начинает убывать температура.

Обобщая сказанное, можно утверждать, что аналогичные эффекты могут проявляться в любой системе, где изменения переменных зависят не только от внешнего воздействия, но и от внутренних лимитирующих факторов. В нашем случае таким

² Содержание углерода в растительности увеличивается, но оно компенсируется сильным уменьшением его запасов в почве

лимитирующим фактором оказывается содержание углерода в почве. Когда оно становится достаточно мало, рост содержания CO_2 в атмосфере оказывается невозможен, несмотря на продолжающееся увеличение температуры и наличие положительной обратной связи между климатом и углеродным циклом.

Третья глава диссертации посвящена исследованию взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при сценариях внешних эмиссий парниковых газов в атмосферу.

В разделе 3.1 описаны две группы идеализированных численных экспериментов, поставленных с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью. Для первой группы использовались версии моделей не включающие блоки метанового цикла, а внешнее воздействие на ЗКС задавалось в виде антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу (периодических и непериодических). С концептуальной моделью эксперименты проведены при различных значениях параметра чувствительности климата $\lambda_0 = \{0.8, 1, 1.8\}$. Для второй группы экспериментов использовались версии моделей, включающие блоки метанового цикла, а внешнее воздействие на ЗКС задавалось в виде синфазных непериодических эмиссий CO_2 и CH_4 . Синфазность эмиссий CO_2 и CH_4 основана на предположении, что годовые антропогенные эмиссии обоих этих газов пропорциональны интенсивности хозяйственной деятельности человека.

В первой группе экспериментов получено, что при периодических внешних эмиссиях CO_2 в атмосферу и нулевом НПРВВ знак взаимного запаздывания Δ_{Tq} между изменениями T и q_{CO_2} не зависит от временного масштаба внешнего воздействия P (в отличие от противоположного случая нулевых эмиссий и ненулевого НПРВВ, рассмотренного во второй главе): при любом значении P изменения T запаздывают относительно изменений q_{CO_2} . По абсолютному значению Δ_{Tq} возрастает по мере увеличения временного масштаба воздействия и достигает асимптотического значения Δ_{Tq}^* .

В экспериментах с КМ ИФА РАН $\Delta_{Tq}^* = -19$ лет. Значение Δ_{Tq}^* практически не зависит от амплитуды внешних эмиссий CO_2 в атмосферу.

В экспериментах с концептуальной моделью значения Δ_{Tq}^* зависят от величины параметра λ_0 , причем $\Delta_{Tq}^*(\lambda_0) \approx -\frac{C}{\lambda_0}$ (см. табл. 2).

Этот результат может быть использован для объяснения количественных различий между значениями запаздываний Δ_{Tq} , полученных в численных экспериментах с моделями MIROC-ESM и КМ ИФА РАН (см. раздел 1.4). Для модели MIROC-ESM $\lambda_0 = 0,8 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{ К}$, для КМ ИФА РАН $\lambda_0 = 1,7 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{ К}$. Это может быть одной из причин того, почему

запаздывание Δ_{Tq} , полученное по результатам расчетов с моделью MIROC в XXI веке, по абсолютно величине больше соответствующего запаздывания, полученного по результатам расчетов с КМ ИФА РАН.

Табл. 2. Асимптотические значения запаздываний Δ_{Tq}^* , полученные в численных экспериментах с концептуальной моделью (столбец 2) и аналитически с использованием ее упрощенной версии (столбец 3).

λ_0 , Вт м ⁻² К ⁻¹	Δ_{Tq}^* , годы	C / λ_0 , годы
0.8	-40	39.7
1	-31	31.8
1.8	-17	17.6

Картина взаимного запаздывания между изменениями q_{CO_2} и T в случае непериодического внешнего воздействия вида подобна полученной для периодического воздействия.

Во второй группе экспериментов получено, что изменения T могут как отставать по фазе от изменений q_{CO_2} , так и опережать их в зависимости от временного масштаба внешнего воздействия P . На вековом временном масштабе изменения T запаздывают относительно изменений q_{CO_2} ($\Delta_{Tq} < 0$), тогда как на тысячелетнем изменения q_{CO_2} запаздывают относительно изменений T ($\Delta_{Tq} > 0$), хотя являются основной причиной их возникновения. Точное значение критического временного масштаба воздействия P_{cr} , при котором запаздывание T относительно q_{CO_2} сменяется опережением, зависит от соотношения амплитуд внешних эмиссий CO_2 и CH_4 .

В разделе 3.2. дается объяснение результатов, полученных в рамках первой группы экспериментов. С использованием уравнения (3) показано, что если изменения q_{CO_2} описываются произвольным линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами (что справедливо при рассмотрении малых колебаний климата), то взаимное запаздывание Δ_{Tq} между q_{CO_2} и T целиком определяется значением коэффициента λ_0 и формой внешнего воздействия на ЗКС. В частности, параметры углеродного цикла не оказывают влияния на значение Δ_{Tq} . Аналитически получено, что асимптотическим значением взаимного запаздывания Δ_{Tq} является величина C/λ_0 .

В разделе 3.3. дано качественное объяснение результатов, полученных в рамках второй группы экспериментов. Оно сделано на основании аналитических решений, полученных с линеаризованной и упрощенной версией концептуальной модели.

Простейшая версия модели, в которой проявляется эффект смены знака запаздывания Δ_{Tq} , описанный в предыдущем параграфе, имеет следующий вид:

$$\frac{dq_{CO_2}}{dt} = -b(q_{CO_2} - q_{CO_2}^{(0)}) + E_{CO_2},$$

$$\frac{dq_{CH_4}}{dt} = -a(q_{CH_4} - q_{CH_4}^{(0)}) + E_{CH_4},$$

$$\frac{dT}{dt} = -\lambda T + Rq_{CO_2} + Fq_{CH_4},$$

где a , b – постоянные коэффициенты, характеризующие времена отклика атмосферных концентраций CH_4 и CO_2 на внешнее воздействие; R , F – постоянные коэффициенты, характеризующие радиационную эффективность CO_2 и CH_4 ; $\lambda = \frac{\lambda_0}{C}$. Если внешние эмиссии задаются в виде $E_{CO_2} = E_{CO_2,0} \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right)$, $E_{CH_4} = E_{CH_4,0} \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right)$, выражение для критического временного масштаба P_{cr} , при котором запаздывание ΔT_q меняет знак, имеет следующий вид:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 + (RE_{CO_2,0} / FE_{CH_4,0})}{a\lambda - b(a + \lambda) - a^2(RE_{CO_2,0} / FE_{CH_4,0})}}.$$

Таким образом показано, что для возникновения обсуждаемого эффекта необходимо наличие двух парниковых газов с различной радиационной эффективностью R и F и различными временами отклика атмосферных концентраций на внешнее воздействие $1/a$ и $1/b$.

Опережение изменениями T вызывающих их изменений q_{CO_2} , полученное во второй группе экспериментов, объясняется следующим образом:

Концентрация метана в атмосфере благодаря его достаточно быстрому окислению спадает быстрее, чем концентрация CO_2 . Вследствие этого максимум суммарного РВВ двух газов, находящийся между максимумами РВВ CO_2 и CH_4 , достигается раньше максимума РВВ CO_2 (одновременного с максимумом его содержания в атмосфере q_{CO_2}). Величина запаздывания между максимумом q_{CO_2} и максимумом суммарного РВВ тем больше, чем больше временной масштаб внешнего воздействия P . При этом максимум T запаздывает относительно максимума суммарного РВВ на время, не превышающее величину C/λ_0 , как было показано в разделе 1.3. Это приводит к тому, что при большом временном масштабе внешнего воздействия максимум T достигается раньше, чем максимум q_{CO_2} (см. рис. 3).

Описанный механизм формирования запаздывания между q_{CO_2} и T включает процессы, учитываемые в широком круге моделей земной системы. Как следствие, можно ожидать проявления отмеченного эффекта и в других подобных моделях.

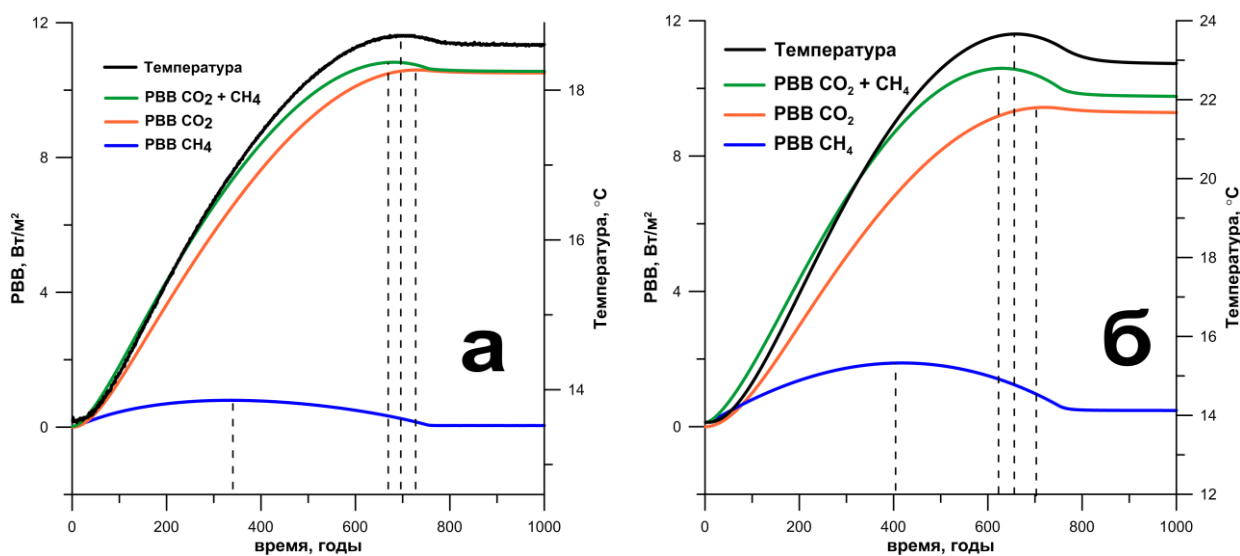


Рис. 3. Зависимость от времени глобальной приповерхностной температуры (черная кривая), суммарного PBB (зеленая кривая), PBB CO₂ (оранжевая кривая), PBB CH₄ (синяя кривая) в численных экспериментах с КМ ИФА РАН (а) и концептуальной моделью (б).

Следует отметить, что существование обсуждаемого эффекта не зависит от того, как меняются при изменении температуры T эмиссии метана из почвы. Также для возникновения эффекта не является существенным превращение метана в атмосфере именно в CO₂. Это означает, что подобные эффекты возможны и для других парниковых газов с временем жизни в атмосфере, значительно меньшим соответствующего времени для CO₂.

В **Заключении** приведены выводы работы, проводится итоговое сопоставление основных результатов исследования, а также намечаются перспективы дальнейшего развития его основных направлений.

В **Приложении 1** показывается, что если единственным парниковым газом, реагирующим на изменения климата, является CO₂, а его внешние эмиссии в атмосферу равны нулю, то взаимное запаздывание ΔT_q между изменениями T и q_{CO_2} не зависит от коэффициентов λ_0 и R_0 , характеризующих, соответственно, чувствительность климата к внешним воздействиям и радиационную эффективность CO₂.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus

1. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажеев А.В. Взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // Доклады АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 708–712

2. Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Timazhev A.V. Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing // *Global and Planetary Change*. 2017. Т. 148. Р. 29–41
3. Мурышев К.Е., Тимажев А.В., Дембицкая М.В. Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при непарниковом внешнем воздействии на климатическую систему // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 3. С. 84–102
4. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Тимажев А.В., Аржанов М.М. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 3. С. 11-19.

Другие публикации

1. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Тимажев А.В. Запаздывание между изменениями температуры и концентрации углекислого газа в атмосфере в расчетах с простой совместной моделью климата и углеродного цикла // *Международная конференция молодых ученых «Изменения климата и природной среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация»*. 14-20 сентября 2014 года. Кисловодск. Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2014. С. 258-260. ISBN 978-5-89118-660-6
2. Muryshev K.E., Timazhev A.V. A phase shift between the changes of global temperature and carbon dioxide concentration in the atmosphere in a simple coupled climate-carbon cycle model // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. E. Astakhova (ed.), WCRP Report No. 12/2015, P.07.17-07.18. 2015.
3. Мурышев К.Е., Тимажев А.В. Зависимость фазового сдвига между изменениями глобальной температуры и концентрации углекислого газа в атмосфере от периода внешнего воздействия // *19-я международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы»*. 25-29 мая 2015 года. Туапсе. Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2015. С. 97. ISBN 978-5-89118-680-4
4. Мурышев К.Е., Тимажев А.В. Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при внешнем воздействии конечной длительности // *Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики»*. 4 – 10 сентября 2016 г. Апатиты, Россия. Сборник тезисов докладов. М.А: Типография ООО «КаэМ», 2016. С. 66. ISBN 978-5-902643-38-8

5. *Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I. and Timazhev A.V.* Lead–lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content depend on type and time scale of the external forcing // Fourth International Conference on Earth System Modelling. 4ICESM-12. 2017.
6. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Аржанов М.М., Тимажев А.В.* Временной сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2018. С. 84. ISBN 978-5-89155-294-4
7. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Аржанов М.М., Тимажев А.В., Дембицкая М.А.* Временные сдвиги между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере // 22-я международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». 23-29 сентября 2018 года. Майкоп. Сборник тезисов докладов. Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2018. С. 77. ISBN 978-5-907004-22-1
8. *Muryshev K.E., Eliseev A.V., Denisov S.N., Mokhov I.I., Timazhev A.V., Arzhanov M.M.* Time lag between changes in global temperature and atmospheric CO₂ content under anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄ into the atmosphere // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012039
9. *Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Arzhanov M.M., Timazhev A.V., Denisov S.N.* Time lag between changes in global temperature and atmospheric CO₂ content according to the results of numerical experiments with Earth system models // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112087U (18 December 2019); doi: 10.1117/12.2540793
10. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Тимажев А.В., Денисов С.Н.* Временной сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере в XIX-XXI вв. по результатам численных экспериментов с моделями Земной системы // XXV Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". Тезисы докладов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2019. С. 121.