

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертацию Мурышева Кирилла Евгеньевича  
«Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры и  
содержания углекислого газа в атмосфере»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 25.00.29 – “физика атмосферы и гидросферы”

Изменения климата, произошедшие в последние десятилетия и ожидаемые в будущем, требуют детального анализа стоящих за ними механизмов. Несмотря на точку зрения, которой придерживается большая часть специалистов по климату и которая связывает изменения климата последних десятилетий с антропогенным парниковым воздействием на климат, существует и точка зрения, отрицающая важную роль антропогенного фактора в современных изменениях климата. Важную роль в аргументации климат-скептиков играют фазовые соотношения между изменением глобальной температуры  $T_g$  и концентрации углекислого газа  $q_{CO_2}$ , полученные по ледовым кернам, а также известные для междекадных вариаций состояния Земной системы в последние столетия (в так называемый малый ледниковый период) и, с некоторыми оговорками, - для данных инструментальных наблюдений за климатом последних десятилетий. Все это указывает на актуальность задачи, поставленной в диссертационной работе К.Е. Мурышева.

В ходе выполнения работы К.Е. Мурышевым получено новое решение актуальной научной проблемы – количественного оценивания и физического объяснения взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры  $T$  и содержания углекислого газа  $q_{CO_2}$  в атмосфере на различных временных масштабах и при различных типах воздействий на Земную систему. Результаты, полученные в диссертационной работе основаны на результатах численных экспериментов с моделями Земной системы различной сложности. Для простейших моделей Земной системы автором также получены аналитические решения. Среди положений, вынесенных К.Е. Мурышевым на защиту, можно отметить следующие:

- Показано, что в экспериментах при доиндустриальных условиях климатические модели в целом воспроизводят опережение температурой концентрации  $CO_2$ . Как следствие, с учетом того, что в таких моделях потепление климата XX века связывается именно с антропогенным парниковым воздействием, такое опережение не может быть использовано в качестве аргумента против роли антропогенного фактора в изменения климата последних десятилетий.
- Фазовые сдвиги между изменениями температуры и  $CO_2$  существенно зависят от типа внешнего воздействия.
- Впервые продемонстрирована зависимость сдвига между глобальной температурой и концентрациями углекислого газа от временного масштаба внешнего воздействия и показано, что в зависимости от масштаба этот сдвиг может менять знак. Впервые показано, что смена знака фазового сдвига в зависимости от масштаба может происходить и в линейной модели. Это связано со взаимодействием спектра временных масштабов в Земной системе.

- Проанализирована роль факторов, приводящих к смене знака между  $T_g$  и  $q_{CO_2}$  при изменении временного масштаба внешнего воздействия на Земную систему. В частности, обнаружено принципиальное влияние углерода почвы на фазовый сдвиг между этими переменными.
- Показано, что смена знака временного сдвига между указанными переменными при одновременных эмиссиях  $CO_2$  и  $CH_4$  в атмосферу обусловлена различием времен отклика атмосферных концентраций этих газов на внешнее воздействие, что приводит к «расфазировке» между изменениями  $q_{CO_2}$  и изменениями суммарного радиационного воздействия  $CO_2$  и  $CH_4$ .

В первой главе дается описание используемых в диссертации моделей, в частности, модели Земной системы промежуточной сложности ИФА, модели общей циркуляции MIROC-ESM и концептуальной модели Земной системы. Детальность описания этих моделей указывает на высокую квалификацию автора работы. Очень удачным является раздел, посвященный иллюстративным численным экспериментам. Он позволяет понять основные принципы работы модели Земной системы, которые используются в дальнейшем. Здесь уже на примере такой простейшей модели наглядно показано, что углеродный цикл запаздывает относительно изменений климата при отсутствии эмиссий  $CO_2$  в атмосферу, но при наличии радиационных возмущающих воздействий иной (непарниковой) природы, тогда как при наличии таких эмиссий отклик углеродного цикла на эмиссии опережает отклик климата. Выделю также раздел, посвященный аналитическим решениям концептуальной модели, который удачно дополняет предыдущие и помогает обсуждению результатов.

Во второй главе исследованы временные сдвиги между изменениями  $T_g$  и  $q_{CO_2}$  при сценариях непарникового внешнего радиационного воздействия. Основу этой главы составляет удачное сочетание численных экспериментов с климатической моделью ИФА РАН и концептуальной моделью Земной системы. Периодическое и непериодическое задание непарникового радиационного возмущающего воздействия, а также численный эксперимент при более сложном характере изменения солнечной постоянной позволили детально исследовать все аспекты взаимного запаздывания между изменениями содержания  $CO_2$  в атмосфере и температуры. Отдельно выделю идеализированный эксперимент, посвященный нетривиальному случаю, когда медленные изменения чередуются с более быстрыми. Такое чередование приводит к тому, что температура то опережает  $q_{CO_2}$ , то отстает от него. Аналитические решения, как и в предыдущей главе, удачно дополняют численные эксперименты и позволяют сделать важные обобщения, приведенные в конце главы. Принципиальным физическим механизмом, обуславливающим полученные результаты, является то, что изменения  $CO_2$  зависят не только от изменений температуры, но и от текущего содержания углерода в наземных экосистемах, при сильном уменьшении которого рост  $q_{CO_2}$  становится невозможен. Этот эффект, известный также и для других систем с донорной связью, позволяет объяснить возможность наличия сдвигов между  $T_g$  и  $q_{CO_2}$  как одного, так и другого знака.

В третьей главе рассматриваются фазовые различия между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при сценариях экзогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу на основе идеализированных численных экспериментов, поставленных с климатической моделью ИФА и

концептуальной моделью. В двух сериях экспериментов, из которых одна проведена при задании идеализированного воздействия на климат внешних антропогенных эмиссий углекислого газа, меняющихся во времени, а вторая проведена при внешних эмиссиях углекислого газа и метана, описан возможный механизм взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры и содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и показано, что изменения температуры могут как отставать по фазе от изменений  $q_{\text{CO}_2}$ , так и опережать их в зависимости от временного масштаба изменений эмиссий. Показано, что различия времен релаксации содержания углекислого газа и метана в атмосфере играют принципиальную роль в формировании фазовых сдвигов того или иного знака.

Тем не менее, представленная диссертация не лишена недостатков. Опуская неизбежные мелкие и редакционные замечания, остановлюсь лишь на нескольких.

1. Целесообразно было бы провести численные эксперименты с моделями при разных начальных условиях, в частности, например, с использованием ансамблевых расчетов. Это было бы достаточно просто сделать, учитывая достаточно «нетребовательные» в вычислительном отношении инструменты, используемые автором.
2. Хотелось бы увидеть анализ экспериментальных данных, даже не в смысле сравнения с модельными оценками, а в смысле анализа тех неопределенностей, которые присутствуют в оценках, основанных на наблюдениях и реконструкциях.
3. Концептуальная модель Земной системы записана в терминах отклонений от некоторого равновесного состояния, однако само это состояние не описано. Как оно влияет на получаемые результаты?
4. Если выбор климатической модели ИФА РАН для целей работы понятен (он связан как с вычислительной «нетребовательностью» модели, так и с организацией, где выполнялась диссертационная работа), то выбор модели MIROC-ESM - одной из примерно трех десятков современных моделей общей циркуляции не совсем понятен. Хотелось бы услышать обоснование этого выбора.

Данные замечания не снижают ценности работы и ни в коей мере не ставят под сомнение достоверность и новизну полученных результатов. Кирилл Евгеньевич уже сейчас широко известен научной общественности по результатам, вошедшим в диссертационную работу. Работа и автореферат написаны хорошим научным языком и легко читаются, даже несмотря на большое количество математических выкладок.

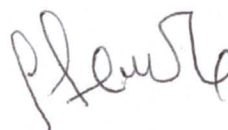
Потенциальными потребителями результатов диссертационной работы являются различные организации Российской Академии наук, Росгидромета, Министерства образования и науки РФ, других ведомств.

Текст автореферата правильно и полно отражает содержание диссертации.

Представленная диссертационная работа выполнена на хорошем, добротном научном уровне. Приведенные выше замечания к ней ни в коей мере не умаляют её значимости и не снижают общего безусловно положительного впечатления о ней. Работа, несомненно, соответствует всем требованиям "Положения о порядке присуждения ученых

степеней", утвержденного Правительством Российской Федерации от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации - К.Е. Мурышев - заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 - "физика атмосферы и гидросферы".

Семенов Сергей Михайлович  
доктор физико-математических наук,  
специальность 03.01.02 - Биофизика



Профессор

Научный руководитель Федерального государственного  
бюджетного учреждения "Институт глобального климата  
и экологии имени академика Ю.А. Израэля"

Адрес: Москва, ул. Глебовская, д. 20Б,

Интернет-сайт: <http://www.igce.ru>

Электронная почта: [fgbuigce@igce.ru](mailto:fgbuigce@igce.ru)

Раб. тел.: (499) 1692411

Я, Семенов Сергей Михайлович, даю согласия на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку.

07.10.2020



С.М. Семенов

Подпись научного руководителя ФГБУ «ИГКЭ» Семенова Сергея Михайловича заверяю.

07.10.2020

Ученый секретарь ФГБУ «ИГКЭ», к.х.н.



А.А. Гладильщикова

