

УДК 551.511

ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ И СОДЕРЖАНИЕМ CO₂ В АТМОСФЕРЕ ПО РАСЧЁТАМ С АНСАМБЛЕМ МОДЕЛЕЙ CMIP6

© 2024 г. К. Е. Мурышев^{1,2,*}, А. В. Елисеев^{1,2,3,4}, академик РАН И. И. Мохов^{1,2,5},
А. В. Тимажев¹, Г. П. Климович¹

Поступило 21.02.2024 г

После доработки 28.02.2024 г.

Принято к публикации 04.03.2024 г.

Проанализированы фазовые сдвиги между глобальной приповерхностной температурой T и содержанием углекислого газа в атмосфере q , полученных в численных экспериментах с моделями Земной климатической системы проекта CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) для периода 1850–2014 гг. Получено, что знак фазового сдвига между q и T зависит не только от анализируемого временного интервала, но и от способа обработки исходных рядов. Исходный ряд q (с отфильтрованным годовым ходом) для большинства моделей и временных интервалов опережает по фазе соответствующий ряд T . Первые разности (междумесечные инкременты) для ряда q отстают по фазе от соответствующих первых разностей для ряда T на величину порядка 10 месяцев с адекватным воспроизведением результатов, полученных при анализе данных наблюдений для последних десятилетий. Это означает, что подобное запаздывание не может служить аргументом против общепринятой теории глобального потепления, связывающей современный рост температуры с доминирующим влиянием антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова: глобальное потепление климата, углеродный цикл, климатические модели, причинно-следственные связи

DOI: 10.31857/S2686739724060163

ВВЕДЕНИЕ

Одно из ключевых направлений климатических исследований связано с обоснованием того, что современное потепление является следствием усиления парникового эффекта из-за антропогенных эмиссий в атмосферу парниковых газов (прежде всего, CO₂) [1]. При этом по данным наблюдений можно получить, что изменения междумесечных инкрементов содержания CO₂ в атмосфере в целом запаздывают относительно соответствующих инкрементов глобальной приповерхностной температуры [2]. Подобный результат может быть получен также по данным

палеореконструкций для середины второго тысячелетия (так называемого малого ледникового периода) [3] и ледниковых циклов плейстоцена [4–6]. Следует отметить, однако, что абсолютные значения такого запаздывания заметно различаются в указанных работах: оно составляет около года для междумесечных инкрементов рядов в XX–XXI веках [2], несколько десятков лет для малого ледникового периода [3] и несколько столетий для ледниковых циклов плейстоцена [4, 5].

Одним из основных принципов физики является “принцип причинности”, согласно которому событие А, предшествующее по времени другому событию В, не может быть его следствием. На основании этого в ряде работ (в частности, [2]) утверждается, что причиной изменений глобальной температуры не могут быть изменения содержания CO₂ в атмосфере, так как последние запаздывают относительно первых. Это утверждение ошибочно, на что неоднократно указывалось ранее [7–11]. Подобного рода запаздывание может быть получено в численных экспериментах с моделями, в которых причиной глобального

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии наук, Москва, Россия

⁴Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁵Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: kmuryshv@mail.ru

потепления XX–XXI вв. является антропогенное увеличение содержания CO₂ в атмосфере. Цель данной работы – обосновать это с использованием расчётов с современными моделями Земной системы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Объектом анализа являются ряды среднемесячных данных для глобальной приповерхностной температуры T и содержания CO₂ в атмосфере q , полученные в численных расчётах с климатическими моделями проекта CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) при сценарии *esm-hist*, подразумевающем воспроизведение изменений климата последних примерно полутора столетий (1850–2014 гг.) с учётом основных антропогенных и естественных воздействий на климат. Используются результаты расчётов со следующими моделями:

1. ACCESS-ESM1-5 (Australian Community Climate and Earth System Simulator)
2. BCC-CSM2-MR (Beijing Climate Center Climate System Model)
3. CanESM5 (Canadian Earth System Model)
4. CESM2 (Community Earth System Model)
5. EC-Earth3-CC (European Community Earth System Model)
6. GFDL-ESM4 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model)
7. MPI-ESM1-2-LR (Max Planck Institute Earth System Model)
8. NorESM2-LM (Norwegian Earth System Model)

Используются результаты расчётов с заданием изменений не концентрации CO₂ в атмосфере, а интенсивности антропогенных эмиссий за счёт сжигания ископаемого топлива с интерактивным расчётом интенсивностей соответствующих эмиссий за счёт землепользования и обмена углеродом между естественными резервуарами.

Между рядами T и q определялся временной лаг Δ , при котором коэффициент корреляции между этими рядами максимален [2, 12]. Неопределённость оценки Δ оценивалась шириной интервала лагов, на границах которого коэффициенты корреляции составляют 95% и 99% от указанного максимального значения.

По аналогии с [2] анализировались ряды первых разностей T' и q' . Для этого исходные ряды

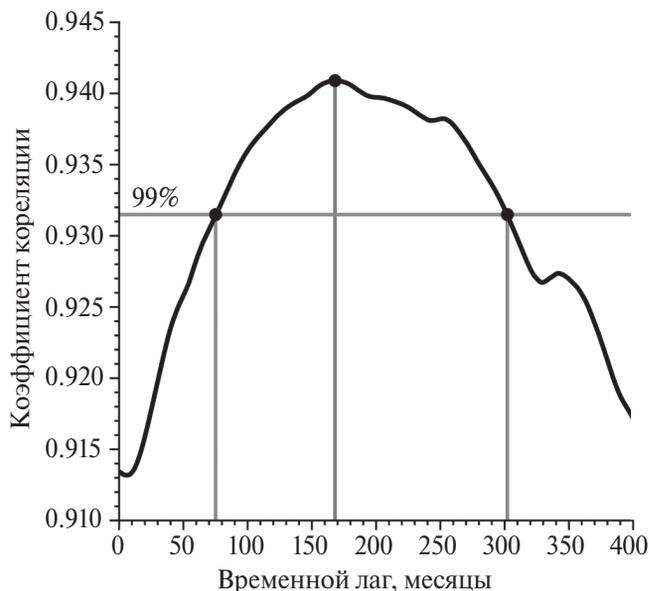


Рис. 1. Корреляционная функция между рядами T и q с отфильтрованным годовым ходом, полученными в численных расчётах с моделью MPI-ESM1-2-LR для периода 1850–2014 гг. при сценарии *esm-hist*.

для T и q сглаживались при помощи 12-точечного скользящего среднего (для устранения годового хода). С использованием полученных сглаженных рядов T и q определялись ряды первых разностей (междумесячных инкрементов) T' и q' :

$$T'_i = (T_{i+1} - T_i) / \Delta t,$$

$$q'_i = (q_{i+1} - q_i) / \Delta t,$$

где $\Delta t = 1$ месяц – шаг по времени, а нижний индекс указывает на порядковый номер месяца во временном ряду.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Вариации глобальной среднемесячной температуры T в исходных рядах, полученных по расчётам с климатическими моделями CMIP6 при сценарии *esm-hist*, в целом (за некоторыми исключениями) “запаздывают” относительно соответствующих вариаций содержания CO₂ в атмосфере q на величину от нескольких десятков до нескольких сотен лет в зависимости от модели и анализируемого временного интервала (рис. 2). При этом, особенности в рядах первых разностей T' в целом проявляются раньше соответствующих особенностей в рядах первых разностей q' – с опережением порядка 10 месяцев. Это качественно и даже количественно соответствует

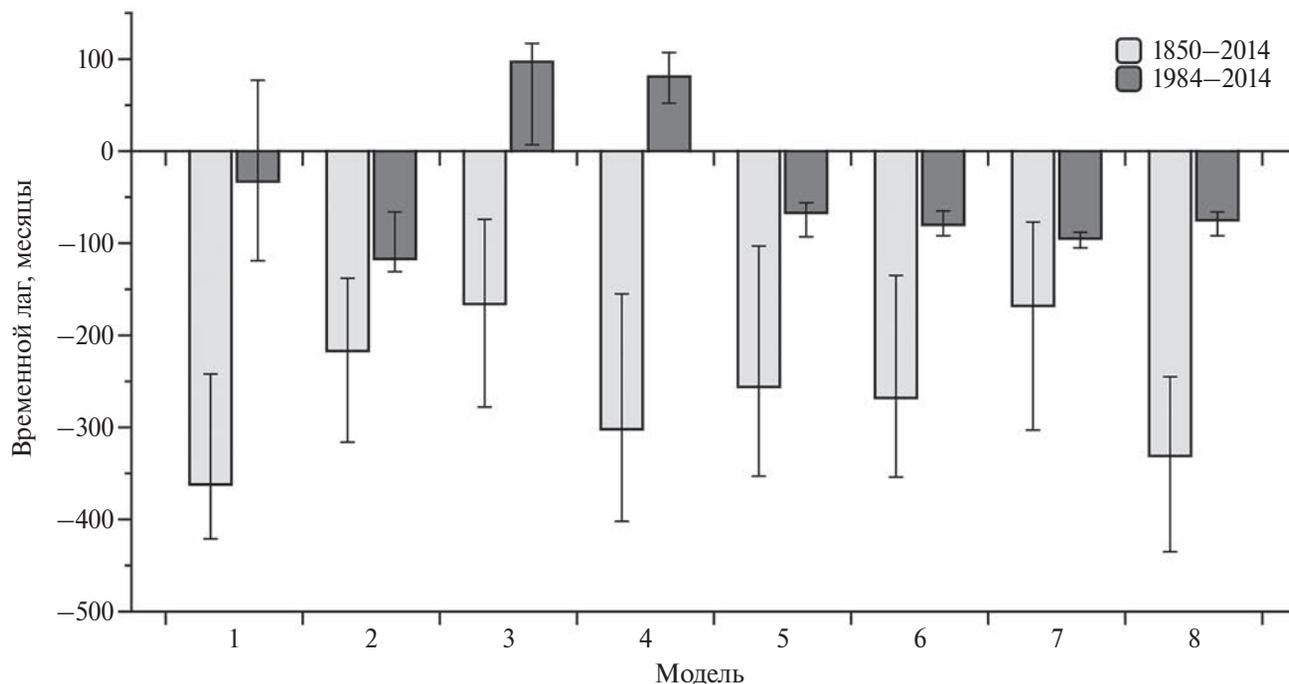


Рис. 2. Лаговая статистика для исходных рядов для глобальной приповерхностной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q , полученных в численных экспериментах с моделями СМIP6 (положительные значения – T опережает q , отрицательные значения – q опережает T) при сценарии esm-hist для временных интервалов 1850–2014 (светлые столбики) и 1984–2014 гг. (тёмные столбики). Линиями показаны 99% интервалы неопределённости.

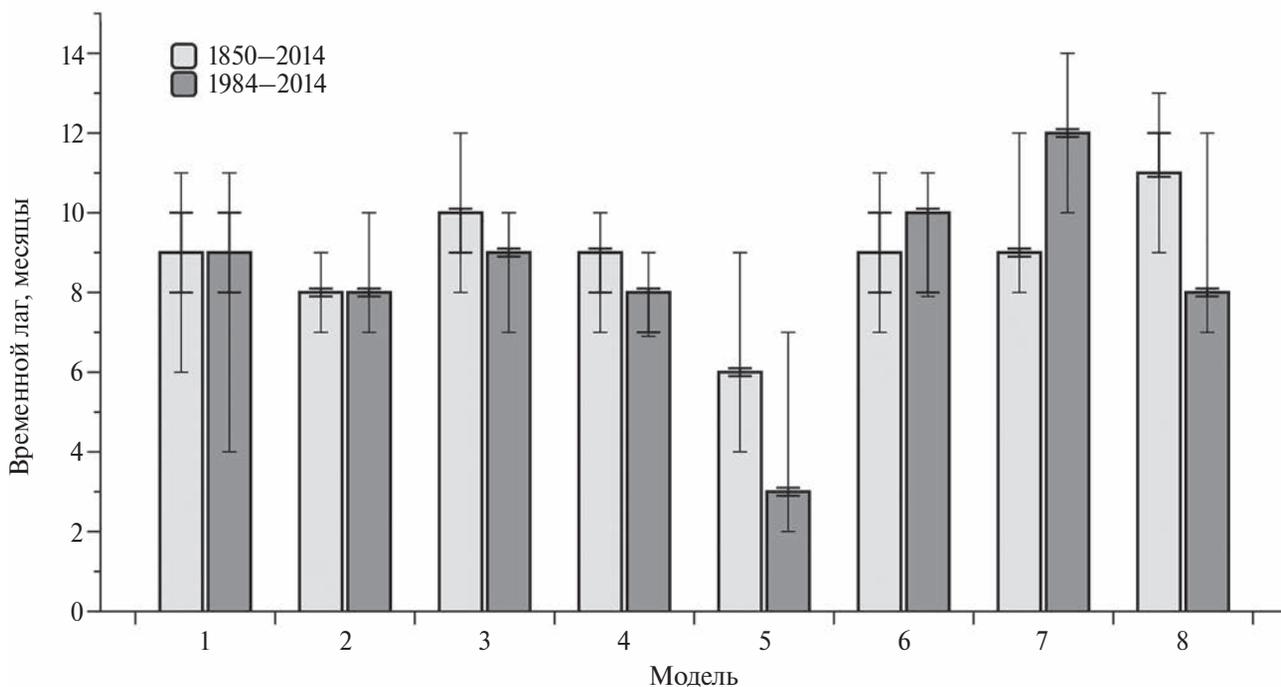


Рис. 3. Лаговая статистика для рядов первых разностей для глобальной приповерхностной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q , полученных в численных экспериментах с моделями СМIP6 (положительные значения – T опережает q , отрицательные значения – q опережает T) при сценарии esm-hist для временных интервалов 1850–2014 (светлые столбики) и 1984–2014 гг. (тёмные столбики). Линиями показаны 95% и 99% интервалы неопределённости.

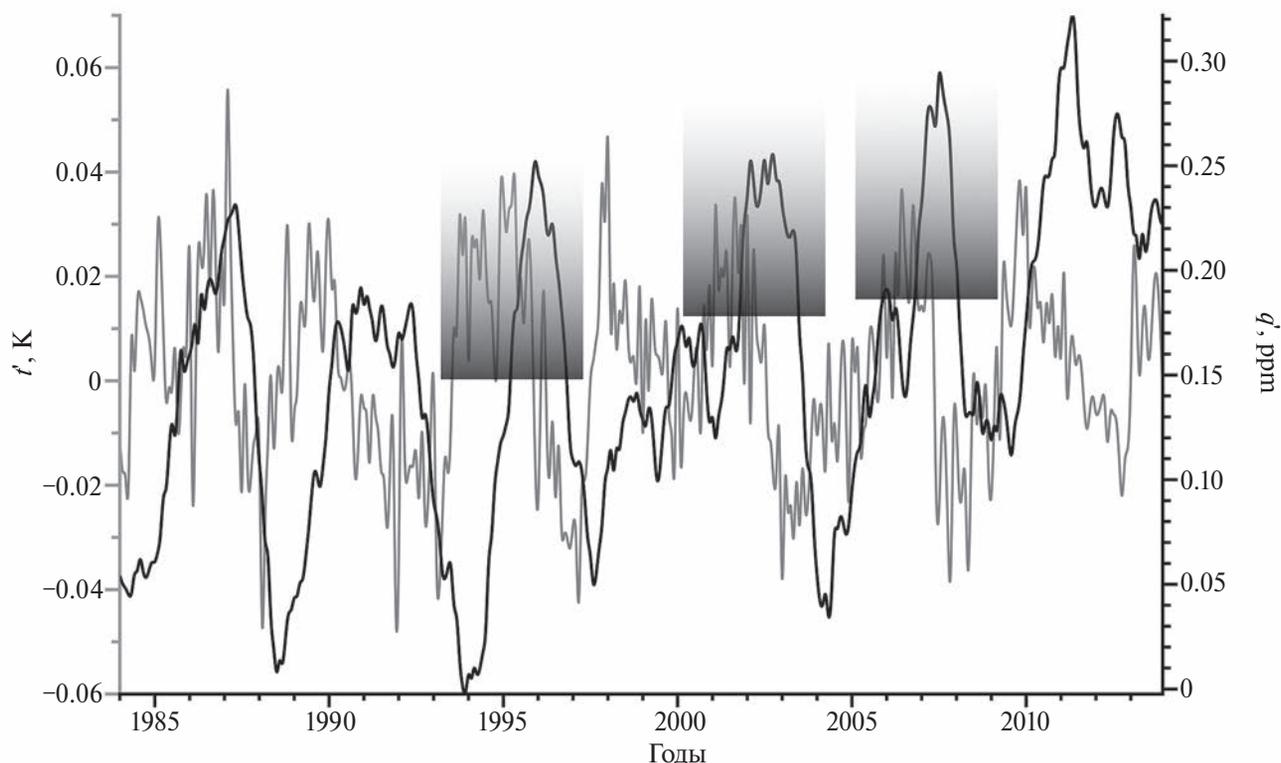


Рис. 4. Ряды q' (чёрные линии) и T' (серые линии) по расчётам с моделью MPI-ESM1-2-LR при сценарии esm-hist для периода 1984–2014 гг. Градиентной заливкой отмечены эпизоды, на примере которых видно запаздывание изменений q относительно изменений T .

результатам, полученным в [2] при анализе данных наблюдений для 1980–2012 гг. (рис. 3).

Как отмечено выше, опережение инкрементами глобальной приповерхностной температуры T инкрементов содержания CO_2 в атмосфере q в последние десятилетия в [2] интерпретировалось как аргумент, опровергающий общепринятую теорию современного глобального потепления, согласно которой общее увеличение T в XX–XXI вв. является откликом на прирост q . Приведённые выше результаты свидетельствуют, что подобный эффект воспроизводится и в климатических моделях, описывающих антропогенное потепление, а значит не может служить его опровержением.

Следует отметить, что между климатом и углеродным циклом существует *обратная связь* [7–9, 13–17], вследствие чего не только изменения содержания CO_2 вызывают изменения глобальной температуры, но и изменения климата (в том числе, температуры) вызывают изменения содержания CO_2 . Однако, изменения глобальной температуры, не связанные с парниковым эффектом, относительно малы и вызывают относительно малые вариации содержания CO_2

в атмосфере по сравнению с его общим ростом, связанным с антропогенными эмиссиями. Фазовый сдвиг между этими малыми вариациями и является предметом обсуждения в [2], но он ничего не говорит о причинах общего роста T и q , наблюдавшегося в XX–XXI вв. и воспроизводимого климатическими моделями.

Вычисление инкрементов для рядов T и q – это одна из форм их высокочастотной фильтрации [18]. В свою очередь, ковариационная функция соответствующих исходных рядов характеризует статистические взаимосвязи между ними на вековом масштабе. Как следствие, различие значений (и знака) Δ между вариантами расчёта с использованием исходных рядов, с одной стороны, и первых разностей – с другой, может характеризовать различие этих взаимосвязей в зависимости от временного масштаба. Это качественно согласуется с результатами [9]. Следует отметить, что, по крайней мере, абсолютная величина оценок Δ по данным наблюдений и палеореконструкций зависит от длины временного ряда и его расположения на временной оси.

Как правило, для одной и той же модели и одного и того же временного интервала знак Δ

различен для исходных рядов T и q (рис. 2) и для рядов их межгодовых инкрементов (рис. 3). Более того, следует отметить, что для исходных рядов T и q в модельных расчётах абсолютные значения (а в ряде случаев – даже знак) Δ зависят от временного интервала. Следует отметить, что использованные модели основаны на фундаментальных уравнениях термогидромеханики и закона сохранения массы. Поэтому структура причинно-следственных связей в моделях не изменяется на протяжении расчёта, несмотря на изменение знака Δ . Это ещё раз иллюстрирует отсутствие прямой связи между знаком фазового сдвига и направленностью причинно-следственных связей в земной климатической системе.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГОБАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ

Описанные выше результаты могут быть интерпретированы с помощью системы из двух линейных дифференциальных уравнений, одно из которых описывает изменения содержания CO_2 в атмосфере q , а другое – изменения глобальной приповерхностной температуры T .

$$\frac{dT}{dt} = Rq - \lambda T + F,$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta q + \gamma T + E.$$

Здесь R , λ , β , γ – постоянные положительные коэффициенты. Физический смысл слагаемых в правых частях уравнений следующий: Rq – линейное приближение для радиационного воздействия CO_2 , λT – линейное приближение для всех обратных связей в климатической системе (в том числе для парникового эффекта водяного пара в атмосфере), F – не связанное с парниковым эффектом радиационное воздействие на климатическую систему (например, за счёт вариаций солнечной постоянной); $-\beta q + \gamma T$ – поток CO_2 в атмосферу из различных естественных резервуаров (включая океан и наземные экосистемы), E – внешние эмиссии CO_2 в атмосферу (в частности, антропогенные эмиссии от сжигания ископаемого топлива).

Для простоты зададим $F = F_0 \sin(\omega t)$, $E = E_0 \exp(At)$. В этом случае приведённая выше система может быть решена аналитически. Пренебрегая быстро затухающими экспоненциальными слагаемыми, решение данной системы можно записать в виде:

$$q = q_s \sin(\omega t + \varphi_q) + q_e \exp(At),$$

$$T = T_s \sin(\omega t + \varphi_T) + T_e \exp(At).$$

“Первым разностям” для рядов T и q соответствуют первые производные соответствующих функций:

$$q' = \omega q_s \cos(\omega t + \varphi_q) + A q_e \exp(At),$$

$$T' = \omega T_s \cos(\omega t + \varphi_T) + A T_e \exp(At).$$

Для достаточно быстрых вариаций F ($|A| \ll \omega$, влиянием экспоненциальных слагаемых при вычислении фазового сдвига можно пренебречь при значениях времени вплоть до $t^* \sim \min[\ln(\omega q_s / A q_e), \ln(\omega T_s / A T_e)]$). Тогда временной лаг Δ в случае максимизации коэффициента корреляции с учётом сдвига, соответствует определяемой аналитически фазовой задержке

$$\Delta_\varphi = \frac{\varphi_T - \varphi_q}{\omega}.$$

Для приведённой выше системы $\Delta_\varphi = \frac{1}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\beta}$.

Это означает, в частности, что, с учётом знакоопределённости коэффициента β в современных моделях [19], фазовая задержка постоянна по знаку. То есть при всех значениях параметров изменения температуры опережают по фазе изменения содержания CO_2 в атмосфере. При этом причиной экспоненциального роста температуры является экспоненциальный рост эмиссий CO_2 в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные климатические модели способны адекватно воспроизводить запаздывание межмесячных инкрементов содержания CO_2 в атмосфере q относительно соответствующих инкрементов глобальной приповерхностной температуры T , отмечаемое по данным наблюдений для последних десятилетий. Следовательно, данное запаздывание не может служить аргументом, опровергающим истинность теории современного глобального потепления, связывающей климатические изменения в последние десятилетия, преимущественно, с антропогенными эмиссиями парниковых газов в атмосферу.

Полученные результаты не противоречат принципу причинности, т. к. последний справедлив для событий, а не для рядов данных (фазовый сдвиг между рядами данных не равнозначен запаздыванию между событиями).

Следует ещё раз подчеркнуть, что использованные модели основаны на фундаментальных законах физики. Как следствие, воспроизводимые ими фазовые сдвиги между глобальной приповерхностной температурой и содержанием CO₂ в атмосфере должны восприниматься как проявление этих законов, а не как следствие их настройки. Более того, даже знак коэффициента β энергобалансовой модели не является просто свойством современного поколения моделей Земной климатической системы [19], а определяются фундаментальной физикой применительно к земному климату. Он связан с хорошо известными эффектами фертилизации наземной растительности углекислым газом атмосферы и влиянием накопления этого газа в приводном слое на его обмен между атмосферой и океаном [20].

Результаты, полученные с использованием расчётов с ансамблем современных моделей CMIP6, подтверждают невозможность в общем случае определить характер причинно-следственной связи между двумя коррелируемыми переменными по фазовой задержке между их изменениями без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ фазовых сдвигов в модели в зависимости от временных масштабов вариаций климата был проведён за счёт гранта Российского научного фонда № 23-62-10043. Анализ вариаций CO₂ в моделях CMIP6 проведён в рамках государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН “Диагностика и моделирование глобальных изменений климата, климата Арктики и российских регионов” (FMWR-2022-0014). При анализе использовались результаты, полученные в рамках проекта РНФ 23-47-00104 и соглашения № 075-15-2021-577 с Минобрнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte et al. (ed.). Cambridge Univ. Press., 2021. 2406 p.
- Humlum O., Stordahl K., Solheim J. E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 100. P. 51–69.
- Cox P., Jones C. Illuminating the Modern Dance of Climate and CO₂ // *Science*. 2008. V. 321. № 5896. P. 1642–1644.
- Monnin E., Indermohle A., Dallenbach A., Flockiger J., Stauffer B., Stocker T., Raynaud D., Barnola J.M. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination // *Science*. 2001. V. 291. № 5501. P. 112–114.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов и температурного режима атмосферы по палеореконструкциям для антарктической станции Восток // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.
- Мохов И.И. Взаимные изменения температуры и содержания аэрозоля в атмосфере по данным антарктических ледовых кернов для последних 800 тысяч лет // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2023. Т. 78. № 3. 2330903.
- 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 // *ДАН*. 2015. Т. 463. № 6. С. 708–712.
- Мурышев К.Е., Тимажеев А.В., Дембицкая М.В. Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере при непарниковом внешнем воздействии на климатическую систему // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 3. С. 84–102.
- Muryshv 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. V. 148. P. 29–41.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Тимажеев 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.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажеев А.В., Аржанов М.М., Денисов С.Н. Влияние нелинейных процессов на временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере // *Доклады АН*. 2021. Т. 501. № 1. С. 62–68.
- Ganopolski A., Roche D. On the nature of lead-lag relationships during glacial-interglacial climate transitions // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 3337–3361.
- Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. Acceleration of global warming due to carbon-

- cycle feedbacks in a coupled climate model // *Nature*. 2000. V. 408. № 6809. P. 184–187
14. *Dufresne J.-L., Friedlingstein P., Berthelot M., Bopp L., Ciais P., Fairhead L., Le Treut H., Monfray P.* On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 10. 1405.
15. *Елисеев А. В., Мохов И. И., Карпенко А. А.* Вариации климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели промежуточной сложности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 1. С. 3–17.
16. *Eliseev A. V., Mokhov I. I.* Carbon cycle-climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // *Theor. Appl. Climatol.* 2007. V. 89. № 1–2. P. 9–24.
17. *Мохов И. И., Елисеев А. В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
18. *Онненгейм А., Шаффер П.* Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.
19. *Arora V. K., Katavouta A., Williams R. G., Jones C. D., Brovkin V., Friedlingstein P., Schwinger J., Bopp L., Boucher O., Cadule P., Chamberlain M. A., Christian J. R., Delire C., Fisher R. A., Hajima T., Ilyina T., Joetzjer E., Kawamiya M., Koven C. D., Krasting J. P., Law R. M., Lawrence D. M., Lenton A., Lindsay K., Pongratz J., Raddatz T., Sèfèrian R., Tachiiri K., Tjiputra J. F., Wiltshire A., Wu T., Ziehn T.* Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models // *Biogeosciences*. 2020. V. 17. № 16. P. 4173–4222.
20. *Елисеев А. В.* Глобальный цикл CO₂: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 4. С. 9–31.

THE PHASE SHIFT BETWEEN THE GLOBAL SURFACE TEMPERATURE AND THE CO₂ CONTENT IN THE ATMOSPHERE ACCORDING TO SIMULATIONS WITH AN ENSEMBLE OF CMIP6 MODELS

K. E. Muryshev^{1,2,*}, A. V. Eliseev^{1,2,3,4}, Academician of the RAS I. I. Mokhov^{1,2,5}, A. V. Timazhev¹, G. P. Klimovich¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

³*Marchuk Institute of Numerical Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

⁴*Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation*

⁵*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudniy, Russian Federation*

*E-mail: kmuryshev@mail.ru

The phase shifts between the global surface temperature T and the carbon dioxide content in the atmosphere q obtained in numerical experiments with models of the Earth climate system of the CMIP6 project (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) for the period 1850–2014 are analyzed. It was found that the sign of the phase shift between q and T depends not only on the analyzed time interval, but also on the method of processing the initial series. The initial q series (with a filtered annual cycle) leads in phase the corresponding T series for most models and time intervals. The first differences (inter-monthly increments) for the q series lag in phase the corresponding first differences for the T series by about 10 months with an adequate reproduction of the results obtained by analyzing observational data for recent decades. This means that such delay cannot be an argument against the generally accepted theory of global warming, which links the current increase in temperature with the dominant influence of anthropogenic greenhouse gas emissions into the atmosphere.

Keywords: global warming, carbon cycle, climate models, cause-and-effect relationships