

УДК 551.511

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВРЕМЕННОЙ ЛАГ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

© 2021 г. К. Е. Мурышев^{1,2,*}, А. В. Елисеев^{1,2,3}, академик РАН И. И. Мохов^{1,2,4},
А. В. Тимажев¹, М. М. Аржанов^{1,2}, С. Н. Денисов^{1,2}

Поступило 26.06.2021 г.

После доработки 26.06.2021 г.

Принято к публикации 26.06.2021 г.

Описан нелинейный механизм формирования временного лага между изменениями глобальной приповерхностной температуры T и содержания углекислого газа в атмосфере q . Показано, что изменения T могут как отставать от изменений q , так и опережать их в зависимости от типа внешнего воздействия, его временного масштаба, амплитуды, а также от направления изменения состояния системы. В частности, когда амплитуды вариаций T и q достаточно велики, отклик одной переменной на изменения другой заметно отличается от линейного: зависимость T от изменений q является логарифмической, а зависимость q от изменений T близка к экспоненциальной. В случае вариаций с временным масштабом от нескольких столетий это приводит к тому, что на этапе роста T опережает q , а на этапе убывания q опережает T , причем вне зависимости от типа внешнего воздействия на Земную систему.

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

DOI: 10.31857/S2686739721110116

ВВЕДЕНИЕ

Одна из серьезных методологических проблем в климатических исследованиях — принципиальная невозможность экспериментальной проверки ряда теоретических положений, поскольку невозможна постановка эксперимента с климатической системой как целым. Для оценки адекватности теории необходима ее проверка на соответствие фундаментальным принципам физики. В том числе используется принцип причинности, означающий, что событие-причина предшествует по времени событию-следствию. Однако формальное применение принципа причинности к системам, подобным Земной системе, может вызывать определенные проблемы. Выводы о характере причинно-следственных связей между климатическими переменными часто делаются только на

основании временного лага между рядами данных для этих переменных в предположении, что изменения переменной с “запаздывающим” рядом не могут быть причиной изменений переменной с “опережающим”. Однако, очевидно, что ряды данных для климатических переменных не являются элементарными событиями, так что принцип причинности в его простейшей интерпретации к ним, вообще говоря, неприменим. В частности, это относится к рядам данных для глобальной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q .

Так, по данным антарктических ледовых кернов [1, 2], реконструкций для малого ледникового периода [3], а также по данным наблюдений для конца XX—начала XXI века [4] можно получить, что изменения q в целом запаздывают относительно изменений T . Поскольку естественно ожидать, что “следствие” не может опережать “причину”, эти результаты используются в качестве аргументов против признания существенной роли антропогенного парникового эффекта в современных изменениях климата. Указанные аргументы критиковались с различных точек зрения [5, 6], однако представление о том, что по запаздыванию между рядами данных можно судить о причинно-следственной связи между перемен-

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: kmuryshev@mail.ru

Таблица 1. Используемые в работе сценарии внешних воздействий на Земную систему

1. Парниковое	$F = 0$	$E_{CO_2}, E_{CO_2, A} \sin(\omega t)$
2. Непарниковое	$F = F_A \sin(\omega t)$	$E_{CO_2} = 0$

ными, большинством критиков не подвергалось сомнению.

В работах [7–10] были продемонстрированы и конкретные физические механизмы изменений T и q , при реализации которых изменения “опережающей” переменной являются откликом на изменения “запаздывающей”. Следует отметить, что нелинейность климатической системы не являлась при этом необходимой для реализации указанных механизмов. В то же время в [11] утверждалось, что такое запаздывание может возникнуть вследствие нелинейности Земной системы, но без указания конкретного механизма. В данной работе рассмотрен механизм формирования запаздывания между изменениями T и q , основанный на нелинейности климатической системы.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Основным инструментом исследования в данной работе является климатическая модель (КМ) ИФА РАН, описанная в [12, 13]. Используемая версия модели включает модули атмосферы, океана, деятельного слоя суши и углеродного цикла. Океаническая подсистема и наземный углеродный цикл описаны в [9].

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С КМ ИФА РАН поставлены численные эксперименты при идеализированных сценариях внешнего воздействия на Земную систему. В качестве внешнего воздействия выступают антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу $E_{CO_2}(t)$ и вариации солнечной постоянной $F(t)$. Соответствующие сценарии представлены в табл. 1.

Синусоидальные функции выбраны для простоты получения аналитических решений при объяснении результатов. Тот факт, что эти функции являются периодическими, не оказывает влияния на результаты экспериментов и не используется при их объяснении.

Численные эксперименты проводились при временных масштабах внешних воздействий $P = 2\pi/\omega$ от 10 до 2000 лет. Амплитуды эмиссий $E_{CO_2, A} = \{1, 2, 5, 10\}$ ГтС/год, амплитуды вариаций солнечной постоянной $F_A = \{13.65, 27.3\}$ Вт/м² и соответствуют ее отклонениям на 1 и 2% от современного значения $S = 1365$ Вт/м².

Исследован временной лаг Δ между рядами глобальной приповерхностной температуры T и

содержания CO_2 в атмосфере q , полученными в указанных численных экспериментах. Величина Δ определялась при помощи стандартного метода максимизации коэффициента корреляции со сдвигом между рядами T и q [1, 2, 4, 5]. Для каждого эксперимента запаздывание Δ вычислялось между фрагментами рядов q и T , соответствующими трем временным интервалам: 1) базовый интервал — между первым и вторым максимумом глобальной температуры T (длина интервала $\sim P$); 2) временной отрезок в первой половине базового интервала, где q и T одновременно убывают (длина интервала $\sim P/2$); 3) временной отрезок во второй половине базового интервала, где q и T одновременно возрастают (длина интервала $\sim P/2$). Заметим, что функции q и T на всех трех интервалах не являются периодическими.

На рис. 1 представлены зависимости временного лага Δ между изменениями q и T на указанных временных интервалах от временного масштаба внешнего форсинга при воздействиях различного типа и амплитуды.

Если Δ вычисляется на базовом временном интервале, то при внешнем воздействии в виде эмиссий CO_2 в атмосферу q опережает T вне зависимости от временного масштаба и амплитуды эмиссий. Напротив, при внешнем воздействии в виде вариаций солнечной постоянной временной лаг Δ , вычисляемый на базовом временном интервале, меняет знак в зависимости от временного масштаба внешнего воздействия P : при малых значениях P изменения T опережают по фазе изменения q , при больших P изменения q опережают по фазе вызывающие их изменения T . Данный эффект уже был описан и объяснен в [7–9]. Напомним, что для его возникновения нелинейность климатической системы не является необходимой.

При вычислении Δ на более коротких временных интервалах, где q и T одновременно убывают или одновременно возрастают, возникает другой эффект: если временной масштаб P и амплитуда внешнего воздействия достаточно велики, то на этапе убывания q опережает T , а на этапе роста T опережает q вне зависимости от того, каким внешним воздействием вызваны происходящие изменения — внешними эмиссиями парниковых газов в атмосферу или какими-либо другими воздействиями. На рис. 2 показано, как выглядят ряды для T и q , в двух экспериментах, где проявляется данный эффект.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нелинейные эффекты, полученные в численных экспериментах с КМ ИФА РАН, на качественном уровне могут быть воспроизведены при помощи глобально-осредненной модели Земной

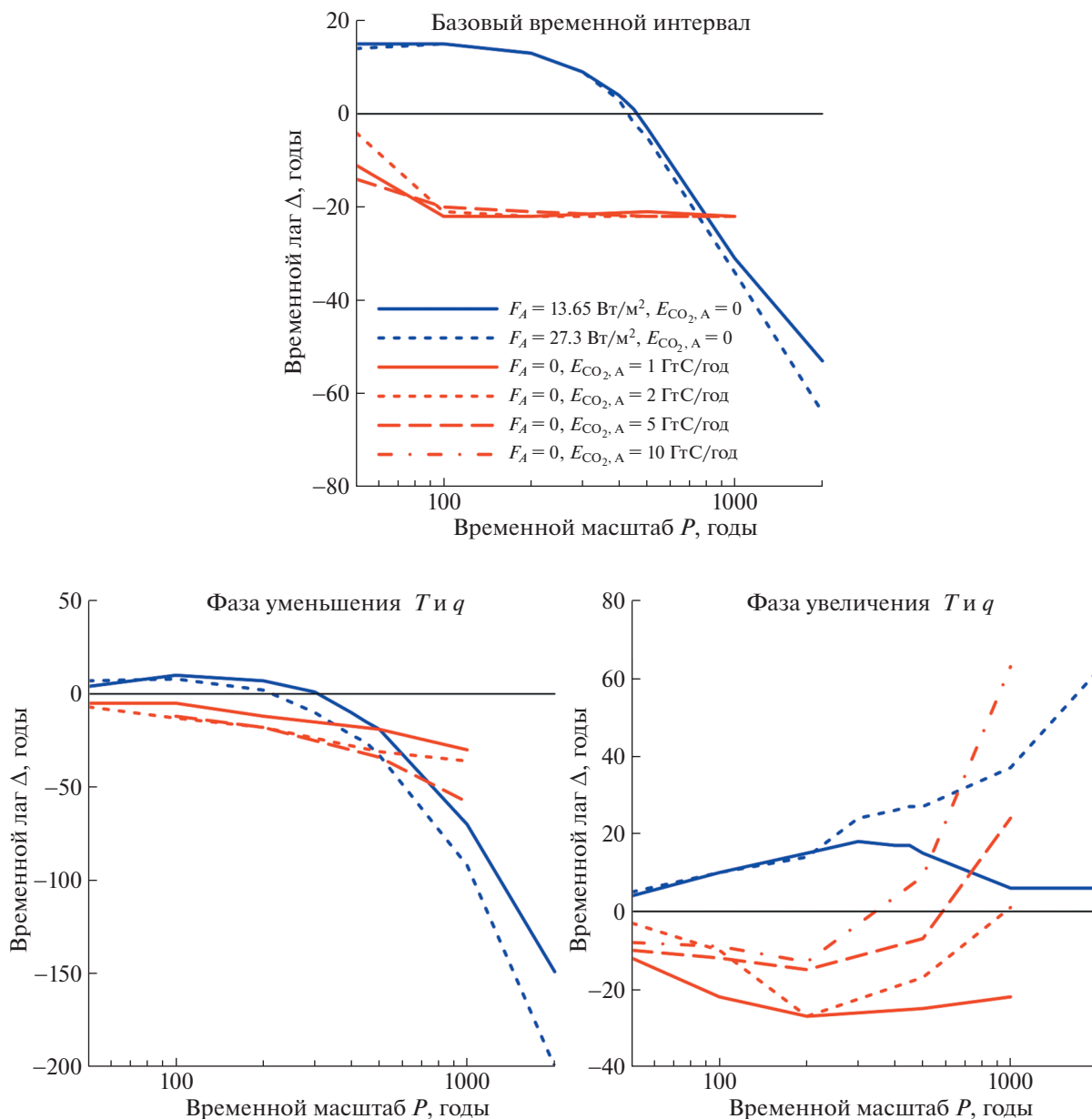


Рис. 1. Временной лаг Δ между рядами глобальной температуры T и содержания углекислого газа в атмосфере q , вычисленный 1) на базовом временном интервале (между первым и вторым максимумом T), длина которого сопоставима с временным масштабом внешнего воздействия на Земную систему; 2) на временном интервале, где q и T уменьшаются; 3) на временном интервале, где q и T растут. Ряды q и T получены в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при описанных выше сценариях эмиссий CO_2 в атмосферу (красные линии) и вариаций солнечной постоянной (синие линии).

системы, состоящей из двух уравнений. Первое из них описывает изменения глобальной приповерхностной температуры T , а второе – изменения содержания углекислого газа в атмосфере q .

$$C \frac{dT}{dt} = -\lambda T + R \ln \left(1 + \frac{q}{q_0} \right) + S(t), \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta q + F_{\text{CO}_2} + E_{\text{CO}_2}(t). \quad (2)$$

Здесь T – отклонение глобальной температуры от равновесного значения 13.7°C ; $C = 10^9 \text{ Дж м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ – эффективная теплоемкость климатической системы на единицу площади земной поверхности; $\lambda = 0.8\text{--}2.5 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент климатической чувствительности, $R = 5.3 \text{ Вт/м}^2$ (соответствует радиационному возмущающему воздействию при удвоении содержания CO_2 в атмосфере, которое составляет 3.7 Вт/м^2), $S(t)$ –

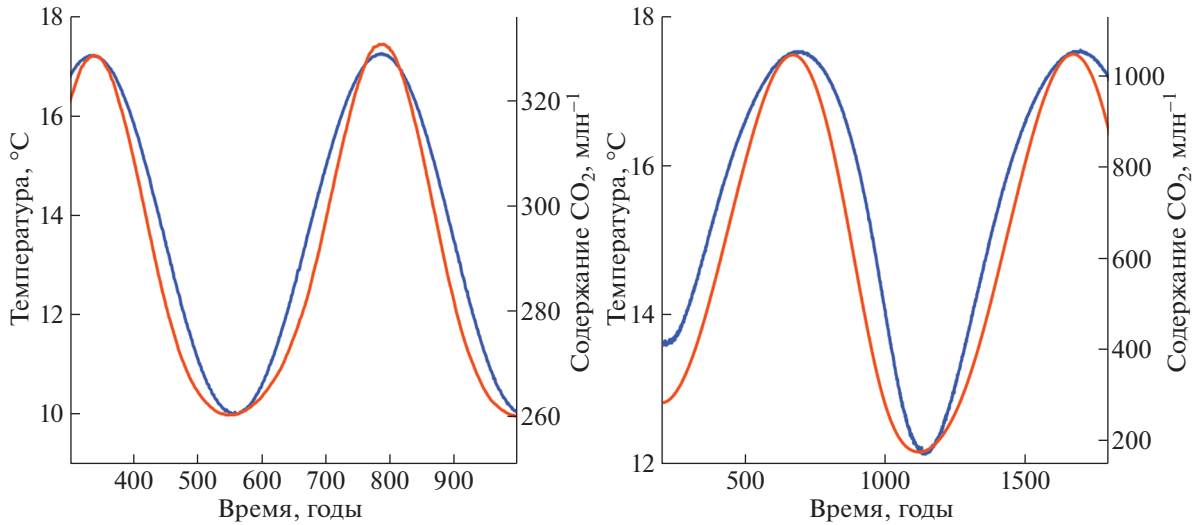


Рис. 2. Изменения глобальной температуры T (синяя кривая) и содержания углекислого газа в атмосфере q (оранжевая кривая) в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при внешних воздействиях в виде вариаций солнечной постоянной с периодом 450 лет и амплитудой 27.3 Вт/м^2 (слева) и в виде эмиссий CO_2 в атмосферу с периодом с периодом 1000 лет и амплитудой 10 ГтС/год (справа).

радиационное возмущающее воздействие (РВВ); q – отклонение содержания CO_2 в атмосфере от равновесного значения 280 млн^{-1} ; β – коэффициент релаксации атмосферной концентрации CO_2 ; F_{CO_2} – поток CO_2 в атмосферу из естественных резервуаров углерода (океан и наземные экосистемы); $E_{\text{CO}_2}(t)$ – внешние (например, антропогенные) эмиссии CO_2 в атмосферу. Рассмотрим отдельно случаи воздействий в виде 1) внешних эмиссий CO_2 в атмосферу ($E(t) \neq 0$) и 2) вариаций солнечной постоянной

1) В случае сильного парникового воздействия можно пренебречь третьим слагаемым в правой части уравнения (1) и вторым слагаемым в правой части уравнения (2). Тогда в случае синусоидальных эмиссий $E_{\text{CO}_2}(t)$ с временным масштабом, большим по сравнению с временем релаксации атмосферной концентрации CO_2 (~ 15 лет), можно пренебречь затухающими экспоненциальными слагаемыми в выражении для q и считать, что оно тоже меняется по синусоидальному закону:

$$q(t) = q_A \sin(\omega t). \quad (3)$$

При рассмотрении изменений с большим временным масштабом решение уравнения (1) близко к стационарному. То есть с учетом (3) можно считать, что

$$T(t) = \frac{R}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{q_A \sin(\omega t)}{q_0} \right). \quad (4)$$

Оценим временной лаг между рядами $q(t)$ и $T(t)$ по положению точек перегиба этих функций, где их вторые производные обращаются в нуль. Такой способ определения запаздывания, строго

говоря, не совпадает с его определением по коэффициенту корреляции со сдвигом, однако соответствует ему на качественном уровне.

Функция $q(t)$ имеет точку перегиба в момент времени t_q , такой что

$$\sin(\omega t_q) = 0. \quad (5)$$

Функция $T(t)$ имеет точку перегиба в момент времени t_T , такой что

$$\sin(\omega t_T) = -\frac{q_A}{q_0}. \quad (6)$$

Очевидно, что $t_T > t_q$ на этапе убывания функций $q(t)$ и $T(t)$, и, напротив, $t_T < t_q$ на этапе роста функций $q(t)$ и $T(t)$. Это и означает, что изменения температуры опережают изменения содержания CO_2 в атмосфере на этапе роста и отстают от них на этапе убывания этих переменных. При этом, как видно из формул (5) и (6), чем меньше амплитуда изменений содержания CO_2 в атмосфере q_A , тем ближе друг к другу значения t_T и t_q , а значит тем меньше по абсолютной величине запаздывание между q и T .

2) В случае, когда доминирует непарниковый форсинг (в нашем случае – вариации солнечной постоянной), можно пренебречь вторым слагаемым в уравнении (1) и третьим слагаемым в уравнении (2). Тогда в случае синусоидальных вариаций солнечной постоянной $S(t)$ с временным масштабом, большим по отношению к величине C/λ (~ 30 лет) вариации глобальной температуры T , тоже можно считать синусоидальными:

$$T(t) = T_A \sin(\omega t). \quad (7)$$

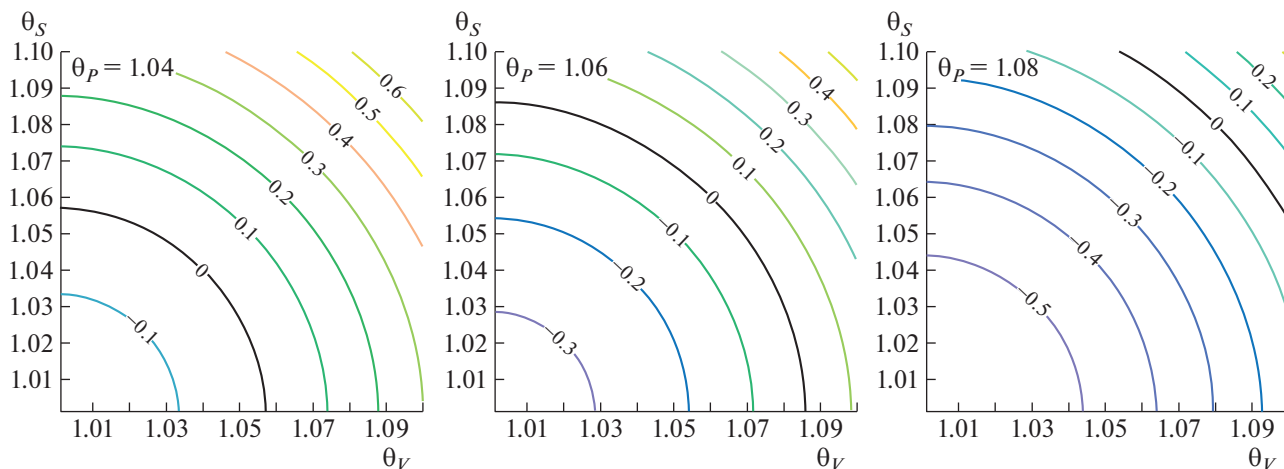


Рис. 3. Значение выражения в квадратных скобках в формуле (11), определяющего знак производной $q''|_{T''=0}$, в зависимости от θ_S и θ_V при $\theta_P = 1.04$ (слева), $\theta_P = 1.06$ (в центре) и $\theta_P = 1.08$ (справа). Если $q''|_{T''=0} > 0$, то для фазы убывания это означает, что q опережает T , а для фазы роста, что T опережает q .

Изменения содержания CO_2 в атмосфере будут описываться следующим уравнением:

$$q' = -\beta q + F_{\text{CO}_2}. \quad (8)$$

В случае изменений с большим временным масштабом решение уравнения (8) близко к стационарному, т.е.

$$q = \frac{F_{\text{CO}_2}}{\beta}. \quad (9)$$

Поток F_{CO_2} — это сумма потоков CO_2 в атмосферу из океана и наземных экосистем. Океанический поток F_{oc} при формировании обсуждаемого эффекта не играет значительной роли (нелинейность зависимости F_{oc} от T гораздо слабее, чем соответствующая нелинейность зависимости наземного потока F_{land}). Поэтому для упрощения математических выкладок влиянием F_{oc} можно пренебречь. Поток углекислого газа из наземных экосистем в атмосферу F_{land} определяется балансом между дыханием почвы S , дыханием растительности V и фотосинтезом P . Для параметризации этих слагаемых в КМ ИФА РАН используется схема [14]. Несколько упрощая ее, можно записать:

$$F_{\text{CO}_2} = S + V - P = A_S M_S \theta_S^{\frac{T}{T_0}} + A_V M_V \theta_V^{\frac{T}{T_0}} - A_P \theta_P^{\frac{T}{T_0}}. \quad (10)$$

Здесь $M_V = 0.55 \times 10^3$ ГтС; $M_S = 1.5 \times 10^3$ ГтС; $A_V = 0.0909$ лет $^{-1}$; $A_S = 0.033$ лет $^{-1}$; $A_P = 0.1$ ГтС/год; $\theta_S = 1.09$; $\theta_V = 1.08$; $\theta_P = 1.04$; $T_0 = 10^\circ\text{C}$. Используя (10), можно оценить знак второй производной q'' в точке, где равна нулю вторая производная T'' , т.е. там, где у функции $T(t)$ точка перегиба. Если в этой точке $q'' > 0$, то для

фазы убывания это означает, что q опережает T , а для фазы роста, что T опережает q .

$$q''|_{T''=0} = \frac{\omega^2 \left(\frac{T_A}{T_0}\right)^2}{\beta} [A_S M_S \ln^2 \theta_S + A_V M_V \ln^2 \theta_V - A_P \ln^2 \theta_P]. \quad (11)$$

Знак $q''|_{T''=0}$ зависит от значения выражения в квадратных скобках, которое в общем случае может быть как положительным, так и отрицательным (см. рис. 3). Однако при характерных для современного климата значениях параметров (приведенных выше) оно принимает положительные значения. Это означает, что в фазе убывания q опережает T , а в фазе роста T опережает q .

Для климатов других эпох знак запаздывания между T и q может оказаться противоположным, если в эти эпохи были характерны другие значения параметров, при которых выражение в правой части (11) оказывается отрицательным. Возможно, этим объясняется то, что согласно [6] при выходе из последнего оледенения (т.е. в фазе роста T и q) изменения глобальной температуры запаздывают относительно изменений содержания CO_2 в атмосфере. Впрочем, последний результат может быть обусловлен также влиянием динамики океана, ледовых щитов и ряда других факторов, не принимавшихся во внимание в настоящей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан один из возможных механизмов формирования взаимного запаздывания между изменениями глобальной приповерхностной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q при внешнем воздействии на Зем-

ную систему в виде внешних эмиссий углекислого газа (парниковое воздействие) или вариаций солнечной постоянной (непарниковое воздействие). Показано, что изменения T могут как отставать от изменений q , так и опережать их в зависимости от типа внешнего воздействия, его временного масштаба, амплитуды, а также от временного интервала, на котором определяется временной лаг Δ между указанными переменными.

В частности, когда амплитуды вариаций T и q достаточно велики, отклик одной переменной на изменения другой заметно отличается от линейного: зависимость T от изменений q является логарифмической, а зависимость q от изменений T близка к экспоненциальной. По этой причине на этапе роста T опережает q , а на этапе убывания q опережает T , причем вне зависимости от того, каким внешним воздействием вызваны изменения T и q , парниковым или непарниковым. Это проявляется при временном масштабе внешнего воздействия от нескольких столетий.

Описанный механизм формирования запаздывания между q и T включает процессы, так или иначе характерные для широкого круга моделей Земной системы. Как следствие, этот эффект должен проявляться и в других подобных моделях.

Кроме того, слагаемое $-\lambda T$ в правой части уравнения для температуры в описанной выше глобально-осредненной энергобалансовой модели (ЭБМ) также является продуктом линеаризации температурных зависимостей планетарного альбедо и уходящего теплового излучения на верхней границе атмосферы [15]. В принципе, учет нелинейности указанных зависимостей способен количественно (но не качественно) изменить полученные результаты. Устойчивость качественных результатов по отношению к учету или неучету такой нелинейности подтверждается результатами расчетов с КМ ИФА РАН, в которой нелинейность указанных зависимостей учитывается более полно по сравнению с использованной в данной работе ЭБМ с углеродным циклом.

В данной работе результаты, полученные в [7–10], обобщены на нелинейные процессы в Земной системе. Полученные новые результаты еще раз свидетельствуют о невозможности в общем случае определить характер причинно-следственной связи между двумя коррелируемыми переменными по запаздыванию между их изменениями без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Результаты анализа временного запаздывания между переменными и их связь с действующими в Земной системе физическими механизмами получены в рамках проекта РНФ 21-17-00012. Диагностика при-

чинно-следственных связей с оценкой роли естественных и антропогенных факторов на разных временных интервалах проводилась в рамках проекта РНФ 19-17-00240.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Cox P., Jones C. Illuminating the Modern Dance of Climate and CO₂ // *Science*. 2008. V. 321. № 5896. P. 1642–1644.
4. 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.
5. 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.
6. Shakun J., Clark P., He F., Marcott S., Mix A., Liu Z., Otto-Bliesner B., Schmittner A., Bard E. Global Warming Preceded by Increasing Carbon Dioxide Concentrations during the Last Deglaciation // *Nature*. 2012. V. 484. № 7392. P. 49–54.
7. Мuryшев 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.
8. Мuryшев 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.
9. 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.
10. Мuryшев 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.
11. Van Nes E.H., Scheer M., Brovkin V., Lenton T.M., Ye H., Deyle E., Sugihara G. Causal Feedbacks in Climate

- Change // Nature Climate Change. 2015. V. 5. P. 445–448.
12. 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.
 13. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
 14. Eliseev A., Mokhov I. Carbon Cycle-climate Feedback Sensitivity to Parameter Changes of a Zero-dimensional Terrestrial Carbon Cycle Scheme in a Climate Model of Intermediate Complexity // Theoretical and Applied Climatology. 2007. V. 89. P. 9–24.
 15. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Аналитические оценки эффективности предотвращения потепления климата контролируемые аэрозольными эмиссиями в стратосферу // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 16–26.

INFLUENCE OF NONLINEAR PROCESSES ON THE TIME LAG BETWEEN CHANGES IN GLOBAL TEMPERATURE AND CARBON DIOXIDE CONTENT IN THE ATMOSPHERE

К. Е. Muryshev^{a,b,#}, A. V. Eliseev^{a,b,c}, academician of the RAS I. I. Mokhov^{a,b,d}, A. V. Timazhev^a, M. M. Arzhanov^{a,b}, and S. N. Denisov^{a,b}

^a Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

^c Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

^d Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, Russian Federation

[#]E-mail: kmuryshev@mail.ru

A nonlinear mechanism for the formation of a time lag between changes in the global surface temperature T and the carbon dioxide content in the atmosphere q is described. It is shown that the changes in T can either lag behind the changes in q or lead them, depending on the type of external forcing, its time scale, amplitude, and the direction of the change in the state of the system. In particular, when the amplitudes of T and q are sufficiently large, the response of one variable to changes in the other is markedly different from the linear one: the dependence of T on changes in q is logarithmic, and the dependence of q on changes in T is close to exponential. In the case of variations with a time scale of several centuries, this leads to the fact that at the growth stage T is ahead of q , and at the decreasing stage q is ahead of T , regardless of the type of external forcing on the Earth system.

Keywords: climate change, cause-effect relationships, climate models, carbon cycle