

УДК 551.511

ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ CO_2 В АТМОСФЕРЕ ПРИ ВНЕШНИХ ЭМИССИЯХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРУ

© 2019 г. К. Е. Мурьшев^{1*}, А. В. Елисеев^{1,2,3}, С. Н. Денисов¹,
И. И. Мохов^{1,2,4}, М. М. Аржанов¹, А. В. Тимажев¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 3

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, с. 2

³Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Казань, ул. Кремлёвская, 8

⁴Московский физико-технический институт
(государственный университет),
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
*e-mail: kmuryshev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2018 г.

Принята к печати 06.02.2019 г.

Ранее было показано, что фазовый сдвиг между изменениями глобальной приповерхностной температуры T_g и содержания CO_2 в атмосфере q_{CO_2} в общем случае не характеризует причинно-следственные связи в земной системе. В частности, при непарниковом радиационном возмущающем воздействии (РВВ) знак этого сдвига меняется в зависимости от временного масштаба РВВ. В данной работе в численных экспериментах с климатической моделью ИФА РАН и концептуальной климатической моделью климата с углеродным циклом исследован фазовый сдвиг между изменениями T_g и q_{CO_2} при внешнем воздействии в виде синфазных по времени внешних эмиссиях углекислого газа и метана в атмосферу. Получено, что при достаточно большом временном масштабе внешнего воздействия изменения q_{CO_2} запаздывают относительно соответствующих изменений T_g .

Ключевые слова: КМ ИФА РАН, изменения климата, углеродный цикл, метановый цикл, причинно-следственные связи.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555311-19>

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная приповерхностная температура T_g 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) [1]. 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 подтвер-

ждается данными эмпирических моделей [2–7] и глобальных климатических моделей [8–14].

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_g и содержания углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} , восстанавливаемое по антарктическим ледовым кернам: согласно этим данным, изменения q_{CO_2} в целом отстают от соответствующих изменений T_g на несколько столетий [15–18]. Кроме того, в [19] на основании данных измерений для 1980–2012 гг.

было показано, что межгодовые изменения q_{CO_2} запаздывают относительно соответствующих изменений T_g . Поскольку естественно ожидать, что следствие не может опережать свою причину, существование подобного запаздывания используется в качестве аргумента для опровержения роли антропогенного парникового эффекта в изменениях климата (напр., [20]).

Однако, в [21] в численных экспериментах с концептуальной моделью климата с углеродным циклом было продемонстрировано запаздывание изменений T_g относительно изменений q_{CO_2} при внешнем воздействии, подразумевая, что изменения q_{CO_2} являются откликом на изменения T_g . В [22, 23] аналогичные результаты были получены в численных экспериментах с глобальной климатической моделью промежуточной сложности, а также приведены аналитические решения, доказывающие возможность существования в ЗКС этого эффекта, и дано его качественное объяснение.

Цель данной работы — показать, что аналогичные эффекты могут проявляться при внешнем воздействии на ЗКС в виде эмиссий в атмосферу нескольких (как минимум двух) парниковых газов, например, CO_2 и CH_4 . При этом изменения q_{CO_2} могут запаздывать относительно изменений T_g , хотя являются основной причиной их возникновения. Простейший пример подобной динамики разных переменных земной климатической системы приведен в [24], где представлены аналитические оценки взаимных вариаций радиационного баланса Земли и его компонентов (см. стр. 139–141).

Взаимное запаздывание между q_{CO_2} и T_g исследуется с использованием результатов численных экспериментов с климатическими моделями разного класса.

КЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИФА РАН

Климатическая модель (КМ) ИФА РАН описана в [25–34]. Модель включает модули атмосферы, океана, деятельного слоя суши, углеродного и метанового циклов.

В частности, блок термо- и гидрофизических процессов в деятельном слое суши описан в [35–37]. Блок углеродного цикла КМ ИФА РАН основан на [27, 28]. Его современная версия описана в [30, 33, 34]. Океанический углеродный цикл представлен глобально-осредненной моделью типа Бакастоу, модифицированной с учетом температурных зависимостей

констант химических реакций [22]. Для расчетов естественной эмиссии метана из влажных экосистем используется схема эмиссий метана [38–40], интегрируемая совместно с моделью процессов тепло- и влагопереноса в почве.

Для метанового цикла атмосферы аналогично [38, 41] использовалось балансовое уравнение

$$\frac{dq_{\text{CH}_4}}{dt} = \frac{E_{\text{CH}_4}}{\beta} - \frac{q_{\text{CH}_4}}{\tau_{\text{tot}}}, \quad (1)$$

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

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

где $\tau_{\text{soil}} = 150$ лет — характерное время разложения метана в почве, а τ_{atm} — время жизни метана в атмосфере, зависящее от температуры [40].

Антропогенные эмиссии метана задаются в виде табулированной функции от времени. Естественные эмиссии этого газа представляются в виде суммы эмиссий из почвы, которые вычисляются интерактивно, и прочих эмиссий естественного происхождения, которым приписывается постоянное значение 65 Мт CH_4 /год [38, 40].

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТА С УГЛЕРОДНЫМ ЦИКЛОМ

Используемая в данной работе концептуальная климатическая модель с углеродным циклом состоит из уравнений, характеризующих изменения среднеглобальных значений температуры и содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере. Первое уравнение описывает тепловой баланс ЗКС (см. напр., [42, 43]):

$$C \frac{dT_g}{dt} = R_{\text{tot}} - \lambda_0 (T_g - T_g^{(0)}), \quad (3)$$

где T_g — глобальная приповерхностная температура, $T_g^{(0)} = 13.7$ °С — ее базовое значение, $C = 10^9$ Дж м⁻² К⁻¹ [42] — теплоемкость единицы площади земной поверхности, примерно соответствующая теплоемкости слоя океана глубиной 350 м, R_{tot} — суммарное радиационное возмущающее воздействие, слагаемое $\lambda_0 (T_g - T_g^{(0)})$ характеризует все климатические обратные связи в линейном виде (в частности, сюда входит парниковый эффект водяного пара). Коэффици-

циент λ_0 называют параметром чувствительности климата. Для современных климатических моделей значение λ_0 находится в диапазоне от 0.6 до 1.6 Вт м⁻² К⁻¹ [1]. В стандартной версии концептуальной модели $\lambda_0 = 1$ Вт м⁻² К⁻¹.

Радиационное возмущающее воздействие (РВВ) R_{tot} можно условно разделить на три слагаемых: первое соответствует парниковому эффекту CO₂, второе — парниковому эффекту CH₄, третье — непарниковым радиационным возмущающим воздействиям (обусловленным, например, изменениями солнечной постоянной, вулканическими извержениями и др).

$$R_{tot} = R_{CO_2} + R_{CH_4} + R_x. \quad (4)$$

В данной работе рассматривается только случай $R_x = 0$.

Парниковое РВВ CO₂ описывается в виде

$$R_{CO_2} = R_0 \ln \left(\frac{q_{CO_2}}{q_{CO_2}^{(0)}} \right), \quad (5)$$

где $q_{CO_2}^{(0)} = 278$ млн⁻¹ — доиндустриальное значение содержания CO₂ в атмосфере. Для современных климатических моделей $R_0 = 5.3$ Вт/м².

Радиационное возмущающее воздействие метана рассчитывается согласно [44]. Содержание метана в атмосфере и его естественные эмиссии рассчитываются аналогично тому, как это делается в КМ ИФА РАН.

Поскольку разрушение метана в атмосфере в результате цепочки химических превращений приводит к образованию углекислого газа, в правой части уравнения для q_{CO_2} возникает дополнительное слагаемое, зависящее от q_{CH_4} . Это уравнение имеет следующий вид:

$$c_0 \frac{dq_{CO_2}}{dt} = E_{CO_2} - F_{land} - F_{oc} + \mu \frac{q_{CH_4}}{\tau_{tot}}, \quad (6)$$

где q_{CO_2} — концентрация углекислого газа в атмосфере [млн⁻¹], $c_0 = 2.123$ ГтС/млн (CO₂)⁻¹, E_{CO_2} — внешние (напр., антропогенные) эмиссии CO₂ в атмосферу, F_{land} и F_{oc} — потоки углерода из атмосферы в наземные экосистемы и в океан соответственно, $\mu = 0.27 \cdot 10^{-3}$ ГтС/млрд(CH₄)⁻¹. Схема расчета потоков F_{land} и F_{oc} описана в [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

С климатической моделью ИФА РАН и концептуальной климатической моделью с углеродным циклом проведены численные эксперимен-

ты при внешнем воздействии в виде эмиссий в атмосферу углекислого газа E_{CO_2} и метана E_{CH_4} , изменяющихся во времени по следующему закону:

$$E_{CO_2}(t) = \begin{cases} E_{CO_2,0} \sin(\omega t), \\ \text{при } \omega t < \pi; 0 \text{ при } \omega t > \pi, \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{CH_4}(t) = \begin{cases} E_{CH_4,0} \sin(\omega t), \\ \text{при } \omega t < \pi; 0 \text{ при } \omega t > \pi, \end{cases} \quad (8)$$

где $t \in (0, +\infty)$ — время, $\omega = 2\pi/P$, P — временной масштаб воздействия. Вид функций (7), (8) при $P = 1000$ лет показан на рис. 1.

Синусоидальная форма эмиссий использована для облегчения процедуры получения аналитических решений, предпринимаемой в дальнейшем для объяснения полученных результатов. Поскольку функции (7), (8) отличны от нуля только при $t < \frac{P}{2}$, изменения T_g и q_{CO_2} , возникающие при таком внешнем воздействии, не являются периодическими. Благодаря этому запаздывание между ними определяется однозначно. Синфазность эмиссий CO₂ и CH₄ основана на предположении, что антропогенные эмиссии обоих этих газов на межгодовом временном масштабе пропорциональны интенсивности хозяйственной деятельности человека.

Расчеты проводились при значениях P , меняющихся в зависимости от численного эксперимента от 10 до 1500 лет, и амплитудах эмиссий $E_{CO_2,0} = 10$ ГтС/год и $E_{CH_4,0} = \{180; 360; 720$ МтCH₄/год}. Амплитуды $E_{CO_2,0} = 10$ ГтС/год и $E_{CH_4,0} = 360$ МтCH₄/год соответствуют значе-

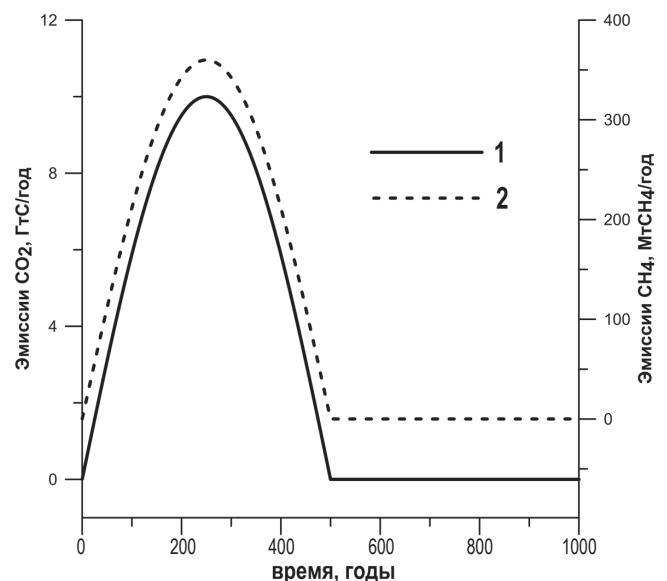


Рис. 1. Синфазные эмиссии CO₂ (кривая 1) и CH₄ (кривая 2) в виде (7), (8) при $P = 1000$ лет.

ниям антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 , характерным для конца XX — начала XXI вв. При таких амплитудах эмиссий относительный вклад CO_2 и CH_4 в суммарный парниковый эффект, получаемый в численных экспериментах, сопоставим с соответствующим вкладом для конца XX — начала XXI вв.

Запаздывание Δ между изменениями T_g и q_{CO_2} определялся по максимуму коэффициента корреляции со сдвигом по времени между рядами T_g и q_{CO_2} . Характерные значения максимального коэффициента корреляции $\geq 0,99$. Результаты анализа численных экспериментов с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью на качественном уровне совпадают между собой (см. рис. 2а, б).

Для узкополосного (в том числе монохроматического) сигнала вычисленное таким образом запаздывание Δ соответствует фазовому сдвигу φ между двумя временными рядами: $\Delta = \varphi/\omega$. Альтернативной характеристикой является групповое запаздывание $\delta = d\varphi/d\omega$. Однако последняя характеристика в данной работе не используется ввиду того, что во всех цитируемых в данной работе публикациях используется именно Δ .

Получено, что изменения T_g 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 ($P < 400$ лет) T_g запаздывает относительно q_{CO_2} ($\Delta < 0$), тогда как на тысячелетнем ($P > 800$ лет) изменения q_{CO_2} запаздывают отно-

сительно изменений T_g ($\Delta > 0$), хотя могут считаться причиной их возникновения. Точное значение критического периода воздействия P_{cr} , при котором запаздывание T_g относительно q_{CO_2} сменяется опережением, зависит от соотношения амплитуд эмиссий CO_2 и CH_4 .

ОБСУЖДЕНИЕ

Простейший вариант концептуальной модели, в которой воспроизводится запаздывание q_{CO_2} относительно T_g на тысячелетнем временном масштабе, соответствует линейаризованной исходной концептуальной модели без учета ряда процессов, второстепенных для данной задачи (в частности, зависимости потоков CO_2 и CH_4 между атмосферой, океаном и сушей от температуры и содержания углерода в наземных экосистемах и океане). Уравнения этой модели приведены ниже.

$$\frac{dq}{dt} = -bq + E_{\text{CO}_2}, \quad (9)$$

$$\frac{dp}{dt} = -ap + E_{\text{CH}_4}, \quad (10)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\lambda T + Rq + Fp. \quad (11)$$

Здесь $q = q_{\text{CO}_2} - q_{\text{CO}_2}^{(0)}$ — отклонение содержания CO_2 в атмосфере от начального (равновесного) значения, $p = q_{\text{CH}_4} - q_{\text{CH}_4}^{(0)}$ — соответствующее

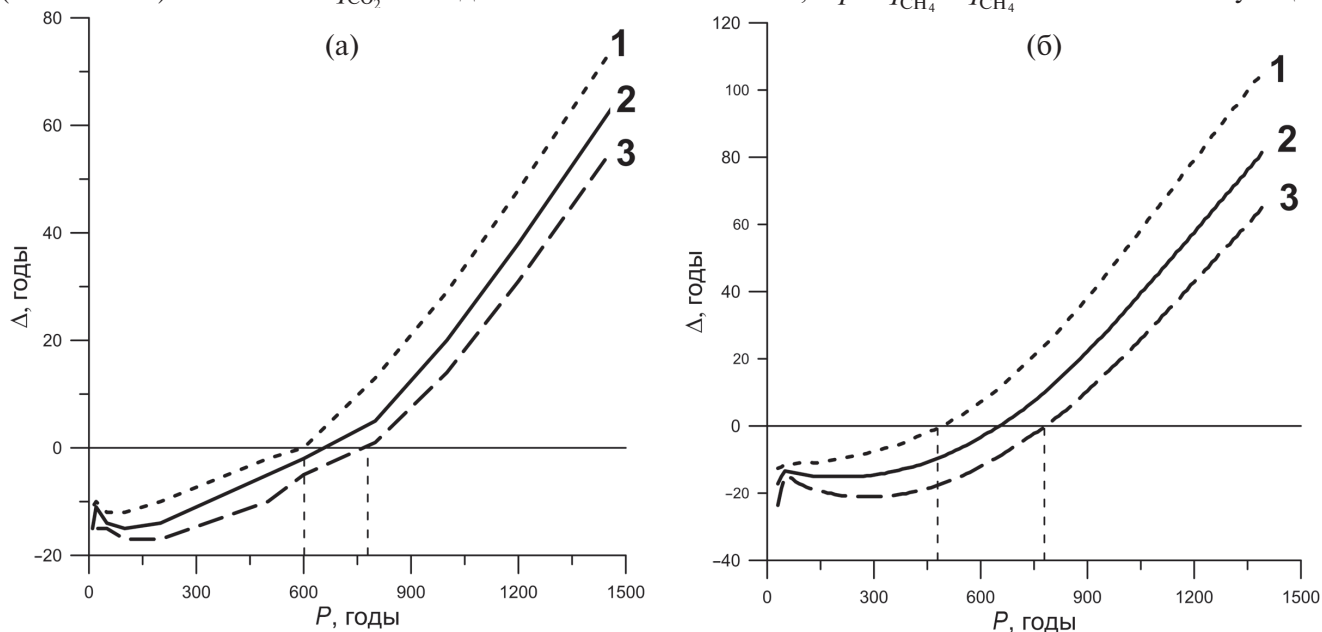


Рис. 2. Запаздывание Δ между изменениями глобальной температуры T_g и содержания в атмосфере углекислого газа q_{CO_2} в численных экспериментах с КМ ИФА РАН (а) и с концептуальной моделью (б) при $E_{\text{CH}_4,0} = 720$ Мт CH_4 /год (кривая 1), $E_{\text{CH}_4,0} = 360$ Мт CH_4 /год (кривая 2) и $E_{\text{CH}_4,0} = 180$ Мт CH_4 /год (кривая 3). $\Delta < 0$ соответствует случаю, когда q_{CO_2} опережает T_g , $\Delta > 0$ — случаю, когда T_g опережает q_{CO_2} .

отклонение содержания в атмосфере метана, $T = T_g - T_g^{(0)}$ — соответствующее отклонение температуры, $\lambda = \frac{\lambda_0}{C}$, $a = \frac{1}{\tau_{tot}}$, b — коэффициент, характеризующий время релаксации q .

Система (9)–(11) может быть решена аналитически. Если внешние эмиссии CO_2 и CH_4 задать в виде (7), (8) то при $\omega t < \pi$ решения для отклонений температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q будут иметь вид:

$$q = q_A \sin(\omega t + \phi_q) + q_b \exp(-bt), \quad (12)$$

$$T = T_A \sin(\omega t + \phi_T) + T_a \exp(-at) + T_b \exp(-bt) + T_\lambda \exp(-\lambda t), \quad (13)$$

где ϕ_T и ϕ_q — фазовые сдвиги T и q относительно внешнего воздействия, причем

$$\phi_q = -\arctg \left[\frac{\omega}{b} \right], \quad (14)$$

$$\phi_T = -\arctg \left[\omega \frac{A + B\lambda}{A\lambda - B\omega^2} \right], \quad (15)$$

где

$$A = \frac{FE_{\text{CH}_4,0}}{\omega^2 + a^2} a + \frac{RE_{\text{CO}_2,0}}{\omega^2 + b^2} b, \quad (16)$$

$$B = \frac{FE_{\text{CH}_4,0}}{\omega^2 + a^2} + \frac{RE_{\text{CO}_2,0}}{\omega^2 + b^2}. \quad (17)$$

Если в формулах (12), (13) пренебречь влиянием затухающих экспоненциальных слагаемых (что допустимо, когда временной масштаб внешнего воздействия много больше характерного времени релаксации системы), то знак запаздывания Δ между изменениями q и T , будет зависеть от соотношения величин ϕ_q и ϕ_T : при $\phi_q > \phi_T$ изменения q опережают изменения T ($\Delta < 0$), при $\phi_q < \phi_T$ изменения T опережают изменения q ($\Delta > 0$).

Таким образом, критический временной масштаб внешнего воздействия $P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}}$, при котором запаздывание T относительно q сменяется опережением, может быть получен из условия $\phi_q = \phi_T$. С учетом (14) и (15) это условие эквивалентно уравнению

$$\frac{A + B\lambda}{A\lambda - B\omega^2} = \frac{1}{b}. \quad (18)$$

Используя выражения (18) и (19), получаем:

$$\omega_{cr}^2 = \frac{a\lambda - b(a + \lambda) - a^2 (RE_{\text{CO}_2,0} / FE_{\text{CH}_4,0})}{1 + (RE_{\text{CO}_2,0} / FE_{\text{CH}_4,0})}. \quad (19)$$

Следовательно,

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 + (RE_{\text{CO}_2,0} / FE_{\text{CH}_4,0})}{a\lambda - b(a + \lambda) - a^2 (RE_{\text{CO}_2,0} / FE_{\text{CH}_4,0})}}. \quad (20)$$

Таким образом, для возникновения обсуждаемого эффекта необходимо наличие двух парниковых газов с различными временами релаксации атмосферных концентраций $1/a$ и $1/b$.

Этому эффекту можно дать качественное объяснение. На рис. 3 показано, как в случае

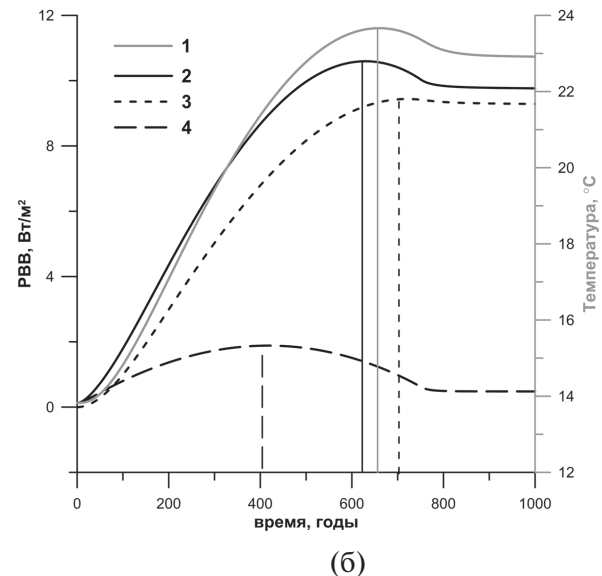
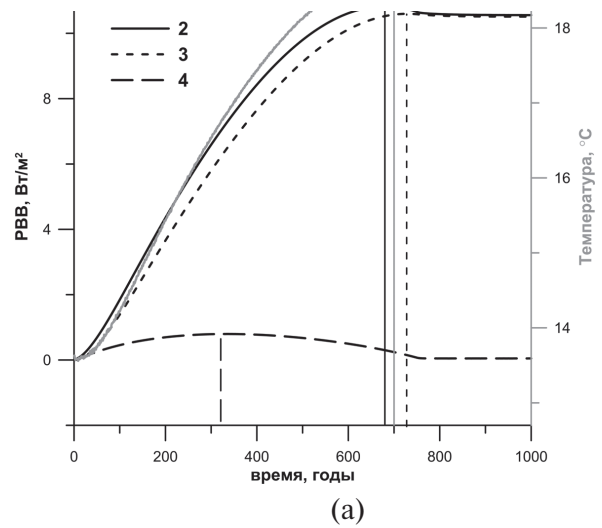


Рис. 3. Зависимость от времени глобальной приповерхностной температуры T_g (кривая 1), суммарного РВВ (кривая 2), РВВ CO_2 (кривая 3), РВВ CH_4 (кривая 4) в численных экспериментах с КМ ИФА РАН (а) и с концептуальной моделью (б) при $E_{\text{CH}_4,0} = 720 \text{ МтCH}_4/\text{год}$ и $P = 1500 \text{ лет}$.

синфазных эмиссий CO_2 и CH_4 меняются во времени РВВ CO_2 и CH_4 , а также их суммарное РВВ и T_g . Концентрация метана в атмосфере благодаря его достаточно быстрому окислению (порядка 10 лет) спадает быстрее, чем концентрация CO_2 . Благодаря этому максимум суммарного РВВ, 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 неограниченно растет при увеличении временного масштаба внешнего воздействия P . При этом максимум T_g запаздывает относительно максимума суммарного РВВ на время τ_T , не превышающее $1/\lambda$. Это приводит к тому, что при большом временном масштабе внешнего воздействия максимум T_g достигается раньше, чем максимум q_{CO_2} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан возможный механизм взаимного запаздывания между изменениями глобальной приповерхностной температуры T_g и содержания CO_2 в атмосфере q_{CO_2} при внешнем воздействии на ЗКС в виде синфазных внешних эмиссий углекислого газа и метана. Показано, что изменения T_g могут как отставать по фазе от изменений q_{CO_2} , так и опережать их в зависимости от временного масштаба изменений эмиссий. В частности, при большом временном масштабе изменений эмиссий изменения q_{CO_2} запаздывают относительно соответствующих изменений T_g , несмотря на то, что могут считаться основной причиной их возникновения (подобно тому, как при непарниковом РВВ с большим временным масштабом изменения q_{CO_2} опережают по фазе вызывающие их изменения T_g [21–23]).

Этот результат является следствием различия времен релаксации q_{CO_2} и q_{CH_4} , благодаря которому при синфазных эмиссиях CO_2 и CH_4 максимум q_{CH_4} опережает максимум суммарного РВВ двух газов R_{tot} , а максимум q_{CO_2} запаздывает относительно него. При большом временном масштабе изменений эмиссий запаздывание q_{CO_2} относительно R_{tot} становится больше, чем соответствующее запаздыва-

ние T_g , зависящее только от параметров обратной связи в ЗКС.

Описанный механизм формирования фазового сдвига между q_{CO_2} и T_g включает процессы, характерные для широкого круга моделей земной системы. Как следствие, можно ожидать проявления отмеченного эффекта и в других подобных моделях.

Следует отметить, что существование обсуждаемого эффекта не зависит от того, как меняются при изменении температуры T_g эмиссии метана из почвы. Также практически не играет роли, что окисленный в атмосфере метан превращается именно в CO_2 . Это означает, что подобные эффекты могут возникать при учете влияния на температуру других парниковых газов.

Полученные результаты свидетельствуют о невозможности в общем случае определить характер причинно-следственной связи между двумя коррелируемыми переменными по фазовому сдвигу между их изменениями без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия. В частности, определяемое по ледниковым кернам и данным инструментальных наблюдений запаздывание между T_g и q_{CO_2} не может быть использовано в качестве аргумента против антропогенного вклада в климатические изменения последних десятилетий.

Специально отметим, что в данной работе не ставится задача анализа причинно-следственных связей в ЗКС. Как показано в данной работе, а также в [21–23], лаговая статистика не может быть использована для подобного анализа. Выбор лаговой статистики в качестве метода анализа временных рядов в работе связан не с попыткой выявления причинно-следственных связей в ЗКС, а формулировкой аргументов, указывающих на несправедливость отрицания антропогенного вклада в изменения климата последних десятилетий (см. Введение). При этом принципиально важно использовать те же методы, что и в работах авторов, отрицающих такой вклад.

Источник финансирования. Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 17-05-01097, 18-05-00087, 18-05-60111) и средств субсидии, выделенных в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных

центров, с использованием результатов, полученных в рамках программы РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Проводились также оценки фазовых сдвигов в климатических процессах в рамках проекта РНФ (№ 19-17-0240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change 2013: The Physical Science Basis. [Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., et al. (eds.)]. Cambridge/New York, Cambridge Univ. Press, 1535 p.
2. *Lean J., Rind D.* How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 18. P. L18701.
3. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Эмпирические оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на глобальную приповерхностную температуру // Доклады АН. 2009. Т. 426. № 5. С. 679–684.
4. *Smirnov D.A., Mokhov I.I.* From Granger causality to long-term causality: application to climatic data // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 80. № 1. P. 016208.
5. *Schonwiese C.D., Walter A., Brinckmann S.* Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. an update // *Meteorol. Zeitschrift.* 2010. V. 19 № 1. P. 3–10.
6. *Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А.* Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Доклады АН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
7. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Оценки вклада Атлантической мультидесятилетней осцилляции и изменений атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений // Доклады АН. 2018. Т. 480. № 1. С. 97–102.
8. *Hegerl G., Hasselmann K., Cubasch U., Mitchell J., Roeckner E., Voss R., Waszkewitz J.* Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change // *Clim. Dyn.* 1997. V. 13. P. 613–634.
9. *Stott P., Tett S., Jones G., Allen M., Ingram W., Mitchell J.* Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes // *Clim. Dyn.* 2001. V. 17. № 1. P. 1–21.
10. *Stone D., Allen M., Selten F., Kliphuis M., Stott P.* The detection and attribution of climate change using an ensemble of opportunity // *J. Climate.* 2007. V. 20. № 3. P. 504–516.
11. *Stone D., Allen M., Stott P., Pall P., Min S. K., Nozawa T., Yukimoto S.* The detection and attribution of human influence on climate // *Annu. Rev. Energy Resour.* 2009. V. 34. P. 1–16.
12. *Sedlacek K., Knutti R.* Evidence for external forcing on 20th-century climate from combined ocean atmosphere warming patterns // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. № 20. P. L20708.
13. *Jones G., Stott P., Christidis N.* Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2013. V. 118. № 10. P. 4001–4024.
14. *Ribes A., Terray L.* Application of regularised optimal fingerprint analysis for attribution. Part II: application to global near-surface temperature // *Clim. Dyn.* 2013. V. 41. № 11–12. P. 2837–2853.
15. *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.
16. *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. 2005а. Т. 41. № 5. С. 579–592.
17. *Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А.* Взаимные изменения температурного режима и содержания парниковых газов в атмосфере по палеореконструкциям для последних 800 тысяч лет / В: Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 312–319.
18. *Bereiter B., Luthi D., Siegrista M., Schupbach S., Stocker T., Fischer H.* Mode change of millennial CO₂ variability during the last glacial cycle associated with a bipolar marine carbon seesaw // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2012. V. 109. № 25. P. 9755–9760.
19. *Humlum O., Stordahl K., Solheim J.E.* The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Glob. Planet. Change.* 2013. V. 100. P. 51–69.
20. *Quinn J.* Global Warming. Geophysical Counterpoints to the Enhanced Greenhouse Theory. Pittsburgh: Dorrance Publ., 2010. 118 p.
21. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажев А.В.* Взаимное запаздывание между измене-

- ниями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // Доклады АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 708–712.
22. *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 // *Glob. Planet. Change.* 2017. V. 148. P. 29–41.
 23. *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.
 24. *Мохов И.И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб: Гидрометеоиздат, 1993. 271 с.
 25. *Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Хон В.Ч., Хворостьянов Д.В.* Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI вв. на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
 26. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В., Сигаева Е.В.* Климатические изменения и их оценки с использованием климатической модели ИФА РАН // *Доклады АН.* 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
 27. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
 28. *Eliseev A., Mokhov I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // *Adv. Atmos. Sci.* 2011. V. 28. № 5. P. 1215–1232.
 29. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // *Доклады АН.* 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
 30. *Елисеев А.В., Сергеев Д.Е.* Влияние подсеточной неоднородности растительности на расчёты характеристик углеродного цикла // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50. № 3. С. 259–270.
 31. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO₂ в атмосферу // *Доклады АН.* 2014. Т. 459. № 4. С. 496–500.
 32. *Eliseev A., Mokhov I., Chernokulsky A.* An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires // *Biogeosciences.* 2014. V. 11. № 12. P. 3205–3223.
 33. *Eliseev A.* Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle // *Glob. Planet. Change.* 2015. V. 124. P. 30–40.
 34. *Елисеев А.В.* Влияние соединений серы в тропосфере на наземный углеродный цикл // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 6. С. 673–683.
 35. *Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч.* Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
 36. *Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI веке по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // *Метеорология и гидрология.* 2013. № 7. С. 31–42.
 37. *Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Мохов И.И.* Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2009. Т. 45. № 3. С. 291–304.
 38. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н.* Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
 39. *Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Чувствительность эмиссий метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки // *Оптика атмосферы и океана.* 2011. Т. 24. № 4. С. 319–322.
 40. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // *Метеорология и гидрология.* 2013. № 11. С. 30–42.
 41. *Osborn T.J., Wigley T.M.L.* A Simple Model for Estimating Methane Concentration and Lifetime Variations // *Clim. Dyn.* 1994. V. 9. P. 181–193.
 42. *Andreae M., Jones C., Cox P.* Strong present-day aerosol cooling implies a hot future // *Nature.* 2005. V. 435. № 7046. P. 1187–1190.
 43. *Masters T., Benestad R.* Comment on “The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature” // *Glob. Planet. Change.* 2013. V. 106. P. 141–142.
 44. *Myhre G., Highwood E.J., Shine K. P., Stordal F.* New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 2715–2718.
 45. *Gedney N., Cox P.M., Huntingford C.* Climate feedback from wetland methane emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L2050.

Phase Shift Between Changes in Global Temperature and Atmospheric CO₂ Content under the External Emissions of Greenhouse Gases into the Atmosphere

К. Е. Мурыйшев^{1*}, А. В. Елизеев^{1, 2, 3}, С. Н. Денисов¹, И. И. Мокхов^{1, 2, 4},
М. М. Аржанов¹, А. В. Тимазhev¹

¹*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,
119017, Moscow, Pyzhevsky per., 3*

²*Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, GSP-1, 1-2 Leninskie Gory*

³*Kazan State University, 420008, Kazan, Kremlyovskaya str., 8*

⁴*Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
141700, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9*

*E-mail: kmuryshv@mail.ru

Received: 05.02.2018

Accepted: 06.02.2019

The phase shift between changes in the global surface temperature T_g and atmospheric CO₂ content has been shown earlier not to characterize causal relationships in the Earth system in the general case. Specifically, the sign of this phase shift under nongreenhouse radiative forcing changes depends on the time scale of this forcing. This paper analyzes the phase shift between changes in the global surface temperature T_g and the atmospheric CO₂ content q_{CO_2} under synchronous external emissions of carbon dioxide and methane into the atmosphere on the basis of numerical experiments with the IAP RAS climatic model and a conceptual climate model with carbon cycle. For a sufficiently large time scale of external forcing, the changes in q_{CO_2} lag relative to the corresponding changes in T_g .

Keywords: IAP RAS CM, climate change, carbon cycle, methane cycle, causal relationships.