

ВЗАИМНОЕ ЗАПАЗДЫВАНИЕ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ ПРИ НЕПАРНИКОВОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

*К.Е. Мурышев**, *А.В. Тимажев*, *М.А. Дембицкая*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3; **kmuryshev@mail.ru*

Резюме. Рассмотрен один из возможных механизмов изменения климата, при котором вариации глобальной температуры запаздывают относительно соответствующих вариаций содержания CO_2 в атмосфере, хотя являются причиной их возникновения. Ранее подобный эффект был получен для случая установившегося периодического режима климатических изменений. В данной работе показано, что он может возникнуть и в случае непериодических изменений. Детально описан соответствующий механизм. Полученные результаты иллюстрируют невозможность в общем случае определить характер причинно-следственной связи между изменениями двух коррелирующих переменных по запаздыванию между ними.

Ключевые слова. Моделирование климата, углеродный цикл, парниковый эффект, причинно-следственные связи.

TIME LAG BETWEEN CHANGES IN GLOBAL TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC CONTENT OF CARBON DIOXIDE UNDER NON-GREENHOUSE EXTERNAL FORCING OF THE CLIMATE SYSTEM

*К.Е. Muryshev**, *A.V. Timazhev*, *M.A. Dembitskaya*

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
3, Pyzhevsky per., 119017, Moscow, Russia; **kmuryshev@mail.ru*

Summary. Possible mechanism leading to a time lag of the global mean surface air temperature behind the atmospheric CO_2 content is considered. The lag takes place despite that the former causes changes of the latter. Earlier, the similar result was obtained for the case of periodic climate changes. As it is shown in this work, this is also valid in the case of non-periodic changes. Respective mechanism of this effect is described in details. The results illustrate that, in general, it is impossible to judge a character of causal relationships between two correlated variables just from the time lag between their changes.

Keywords. Climate modeling, carbon cycle, greenhouse effect, casual relationships.

Введение

Средняя приземная температура 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 соответствующим интервалом 0.49-0.89 К) (Climate change, 2013). В соответствии с общепринятыми представлениями, основной причиной происходящего потепления является антропогенный парниковый эффект, дополняемый, а иногда компенсируемый антропогенным воздействием иной природы. Это подтверждается данными эмпирических моделей (Lean and Rind, 2008; Мохов, Смирнов, 2009; Smirnoff and Mokhov, 2009; Schönweise et al., 2010; Мохов и др., 2012; Mikšovský et al., 2016) и глобальных климатических моделей (Hegerl et al., 1997; Stott et al., 2001; Stone et al., 2007, 2009; Sedlacek and Knutti, 2012; Jones et al., 2013; Ribes and Terray, 2013).

Тем не менее, существуют альтернативные гипотезы относительно природы наблюдаемого потепления. В соответствии с ними основной вклад в его формирование вносят естественные (неантропогенные) факторы. Наиболее известны гипотезы, объясняющие потепление как отклик ЗКС на изменения солнечной активности (напр., Soon et al., 1996; Idso, 1998; Quinn, 2010; Scafetta, 2012) или как следствие естественной изменчивости ЗКС (напр., Lindzen, 1990).

Одним из популярных аргументов в поддержку этих гипотез является взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере, восстанавливаемое по антарктическим ледовым кернам: согласно этим данным, изменения содержания CO_2 отстают от соответствующих изменений температуры на несколько столетий (Monnin et al., 2001; Caillon et al., 2003; Мохов и др., 2005a; Bereiter et al., 2012). 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., Quinn, 2010).

Кроме того, в (Humlum et al., 2013) на основании данных измерений для 1980-2012 гг. было показано, что межгодовые изменения содержания CO_2 в атмосфере запаздывают относительно соответствующих изменений глобальной приповерхностной температуры. Этот результат также используется в качестве аргумента, опровергающего представления о ведущей роли антропогенного парникового эффекта в происходящих изменениях климата.

Указанные аргументы критиковались с различных точек зрения. Применительно к выводам, полученным на основании данных палеорекоonstrukций, отмечалось, что по антарктическим ледовым кернам можно восстановить только региональную, а не глобальную температуру, тогда как изменения антарктической температуры на протяжении межледниковий опережают изменения глобальной на несколько тысячелетий (Stocker and Johnsen, 2003; Schmittner et al., 2003; Ganopolski and Roche, 2009; Shakun et al., 2012). Выводы (Humlum et al., 2013) подвергались критике в (Kern and Leuenberger,

2013; Masters and Benestad, 2013; Richardson, 2013). В частности, в (Masters and Benestad, 2013) запаздывание CO_2 относительно температуры, аналогичное отмеченному в (Humlum et al., 2013), было получено в экспериментах с климатическими моделями, основанными на общепринятых представлениях о роли антропогенного парникового эффекта в климатических изменениях.

Тем не менее, представление о том, что запаздывание между изменениями климатических переменных является надежным индикатором причинно-следственных связей в ЗКС, в рамках этой критики не подвергалось сомнению. С одной стороны, невозможность *в общем случае* определить направление причинно-следственной связи между изменениями двух переменных по фазовому сдвигу между ними является тривиальным фактом. С другой стороны, существуют динамические системы, для которых это возможно, и при исследовании причин изменений климата в (Humlum et al., 2013) фактически использовалось неявное предположение, что климатическая система относится к их числу.

Однако в (Мурышев и др., 2015) в численных экспериментах с концептуальной моделью климата-углеродного цикла было продемонстрировано запаздывание изменений содержания CO_2 в атмосфере q относительно изменений глобальной температуры T при периодическом внешнем воздействии, подразумевающим, что изменения q являются откликом на изменения T . В (Muryshev et al., 2017) аналогичный результат был получен в экспериментах с климатической моделью промежуточной сложности. Там же были приведены некоторые аналитические решения, доказывающие возможность существования в ЗКС этого эффекта, но механизм, приводящий к его возникновению, описан недостаточно детально.

Цель настоящей работы – во-первых, показать, что полученные в (Мурышев и др., 2015) и (Muryshev et al., 2017) результаты являются также справедливыми в случае непериодического внешнего воздействия, а во-вторых, дать обсуждаемому эффекту качественное объяснение, которое сделало бы механизм его возникновения интуитивно понятным.

Методы и материалы.

В настоящей работе взаимное запаздывание между изменениями q и T исследуется на основании численных экспериментов с использованием иерархии климатических моделей. Наиболее полной из используемых моделей является климатическая модель ИФА РАН (КМ ИФА РАН), относящаяся к классу моделей промежуточной сложности и достаточно реалистично воспроизводящая крупномасштабные процессы в ЗКС (ее описание см. ниже). Недостатком этой, как и любой другой достаточно детальной модели, является проблематичность интерпретации полученных результатов: если механизм воспроизводящегося в модели явления заранее не известен, то для определения, какие именно из моделируемых процессов обуславливают его возникновение, требуется постановка большого количества дополнительных численных экспериментов.

В связи с этим результаты, полученные в численных экспериментах с КМ ИФА РАН, воспроизведены также при помощи концептуальной модели, учитывающей только основные факторы взаимодействия климата и углеродного цикла (ее описание см. ниже). Это дает основания полагать, что механизмы, обуславливающие возникновение исследуемого эффекта в модели промежуточной сложности, действуют также в концептуальной модели и не являются проявлениями частных особенностей КМ ИФА РАН.

После воспроизведения исследуемого эффекта в исходной концептуальной модели проводится серия ее последовательных упрощений, в результате которой возникает иерархия упрощенных моделей, в каждой из которых учитывается лишь часть механизмов, включенных в исходную концептуальную модель. При этом подразумевается, что простейшая из полученных моделей, в которой воспроизводится исследуемый эффект, включает в себя только те механизмы, которые необходимы для его возникновения. Исходя из структуры этой модели дается качественное объяснение эффекта. В нашем случае исследуемый эффект сохраняется в модели, сведенной к системе линейных дифференциальных уравнений, допускающей аналитическое решение.

Описание климатической модели ИФА РАН

КМ ИФА РАН описана в (Мохов и др., 2005b; Елисеев, 2011; Eliseev and Mokhov, 2011; Мохов, Елисеев, 2012; Елисеев, Сергеев, 2014; Елисеев и др., 2014; Eliseev et al., 2014; Eliseev, 2015).

Модель включает модули атмосферы, океана, деятельного слоя суши и наземного углеродного цикла. В атмосферном модуле решается уравнение переноса тепла, осредненное на характерных для атмосферы временном (порядка нескольких дней) и пространственном (порядка радиуса деформации Россби) синоптических масштабах, интерактивно рассчитывается содержание водяного пара в атмосфере. Синоптические процессы параметризованы в предположении гауссовой статистики для их ансамблей. Атмосферный модуль также включает в себя схемы переноса радиации в атмосфере, формирования облаков и осадков и обмена теплом и влагой между атмосферой и земной поверхностью. Важной особенностью КМ ИФА РАН является допущение универсальных (но с различными вертикальными масштабами) экспоненциальных профилей плотности воздуха и удельной влажности атмосферы и универсального линейного профиля температуры в тропосфере, зависящего от приповерхностной температуры воздуха. В этом отношении атмосферный модуль КМ ИФА РАН аналогичен соответствующему модулю, используемому в модели промежуточной сложности Climber-2 (Ganopolski et al., 2001; Petoukhov et al., 2000), но с большим пространственным разрешением: 4.5° широты на 6° долготы.

В океаническом блоке КМ ИФА РАН явным образом решаются уравнения переноса тепла и импульса, осредненные на характерных океанических временном и пространственном масштабах. Эти уравнения решаются в предположении универсальности профилей температуры. Следует отметить, что

последнее допущение может приводить к недооценке временного масштаба океанического отклика на внешнее воздействие. Синоптические процессы также параметризованы. Соленость океана предписана.

Основными уравнениями модуля поверхности суши являются уравнение диффузии и уравнение Ричардса для инфильтрации воды в почву, по которым рассчитываются потоки тепла и влаги на границе почвы и атмосферы (Елисеев и др., 2009). Рассчитанный таким образом запас влаги в почве используется в числе прочего в модуле углеродного цикла КМ ИФА РАН.

Блок углеродного цикла КМ ИФА РАН впервые описан в (Елисеев, 2011; Eliseev and Mokhov, 2011). В его наземной части 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 подсеточной неоднородности (Елисеев, Сергеев, 2014). Последняя версия наземного углеродного цикла КМ ИФА РАН описана в (Eliseev, 2015). Океанический углеродный цикл представлен глобально осредненной моделью типа Бакастоу, модифицированной с учетом температурных зависимостей констант химических реакций (Millero, 1995). Более подробное описание блока океанического углеродного цикла, используемого в модели, см. в (Muryshev et al., 2017).

Таким образом, в КМ ИФА РАН явно учитывается вклад океана в тепловой и углеродный баланс ЗКС.

Описание концептуальной модели

Данная модель описана в (Мурышев и др., 2015), (Muryshev et al., 2017). Она состоит из двух уравнений, определяющих изменения T и q , под которыми в данном подразумеваются не абсолютные значения глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере, а их отклонения от равновесных (доиндустриальных) значений. Первое уравнение описывает тепловой баланс ЗКС (см. напр., Andreae et al., 2005; Masters and Benestad, 2013):

$$C \frac{dT}{dt} = R - \lambda T \quad (1)$$

где $C = 10^9 \text{Дж м}^{-2} \text{К}^{-1}$ (Andreae et al., 2005) – теплоемкость единицы площади земной поверхности, примерно соответствующая теплоемкости слоя океана глубиной 350 м, R – суммарное радиационное возмущающее воздействие, слагаемое λT характеризует все климатические обратные связи в линейном виде (в частности, сюда входит зависимость влажности атмосферы от температуры). Коэффициент λ называют параметром чувствительности климата.

Радиационное возмущающее воздействие R можно условно разделить на два слагаемых: первое соответствует его части, вызванной парниковым эффектом CO_2 , второе – непарниковыми радиационными возмущающими

воздействиями (НПРВВ) – например, изменениями солнечной постоянной, вулканическими извержениями и др.

$$R = R_{co_2} + R_x \quad (2)$$

Вклад парникового эффекта CO₂ описывается следующим образом:

$$R_{co_2} = R_0 \ln \left(1 + \frac{q}{q_0} \right) \quad (3)$$

где $q_0 = 278 \text{ млн}^{-1}$ – доиндустриальное значение содержания CO₂ в атмосфере, R_0 – нормировочный коэффициент. Для современных климатических моделей $R_0 = 5.3 \text{ Вт/м}^2$, λ находится в диапазоне от 0.6 до 1.6 $\text{Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ (Climate change, 2013, таблица 9.5). В стандартной версии концептуальной модели $\lambda = 1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$.

Второе уравнение модели описывает глобальный углеродный цикл:

$$c_0 \frac{dq}{dt} = E - F_{land} - F_{oc} \quad (4)$$

где $c_0 = 2.123 \text{ ГтС/млн}^{-1}$, E – внешние (напр., антропогенные) эмиссии CO₂ в атмосферу, F_{land} и F_{oc} – потоки углерода из атмосферы в наземные экосистемы и в океан соответственно. Поток углерода из атмосферы в океан рассчитывается при помощи той же модели типа Бакастоу, которая используется в океаническом блоке КМ ИФА РАН, но с использованием глобально осредненной температуры земной поверхности вместо температуры поверхности океана:

$$F_{oc} = F_0 * \chi(T) * \left[q - \zeta(q, T) \frac{q_0}{D_0} D \right] \quad (5)$$

Здесь D – отклонение содержания растворенного в океане неорганического углерода от его первоначального (равновесного) значения, $\chi(T)$ – растворимость CO₂ в морской воде, деленная на ее доиндустриальное значение, $\zeta(q, T)$ – буферный фактор, $D_0 = 1.5 \times 10^4 \text{ ГтС}$, коэффициент $F_0 = 3.5 \times 10^{-2} \text{ ГтС год}^{-1} \text{ млн}^{-1}$. Зависимости $\chi(T)$ и $\zeta(q, T)$ приведены в (Murgyshev et al., 2017). В свою очередь,

$$\frac{dD}{dt} = F_{oc} \quad (6)$$

Таким образом, в концептуальной модели, как и в КМ ИФА РАН явно учитывается вклад океана в тепловой и углеродный баланс ЗКС.

Поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы F_{land} определяется балансом интенсивности фотосинтеза P , дыхания растительности R_v и дыхания почвы R_s .

$$F_{land} = P - R_v - R_s \quad (7)$$

В полной версии концептуальной модели для расчета указанных переменных используется схема, описанная в (Eliseev and Mokhov, 2007; Lenton, 2000):

$$\begin{aligned}
 P &= A_p g_f(q) \theta_p^T, \\
 R_v &= A_v (M_v + M_{v,0}) \theta_v^T, \\
 R_s &= A_s (M_s + M_{s,0}) \theta_s^T,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где M_v и M_s – аномалии содержания углерода в растительности и почве соответственно, $M_{v,0}$ и $M_{s,0}$ – начальные значения запасов углерода в этих резервуарах, $A_p = 153.6 \text{ PgC yr}^{-1}$, $A_v = 0.09 \text{ yr}^{-1}$, $A_s = A_v M_{v,0} / M_{s,0}$, поскольку в состоянии равновесия чистая первичная продукция $NPP = P - R_v = R_s$, составляет примерно половину P (Zhang et al., 2014), функция

$$g_f(q) = \frac{q + q_0}{q + q_0 + q_{1/2}}
 \tag{9}$$

характеризует отклик фотосинтеза на увеличение содержания CO_2 в атмосфере, $q_{1/2} = 318 \text{ ГтС}$, $\theta_p = 1.04$, $\theta_v = 1.08$, $\theta_s = 1.09$ (Lenton, 2000).

Изменения M_v и M_s описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \frac{dM_v}{dt} &= P - R_v - L, \\
 \frac{dM_s}{dt} &= L - R_s,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где L – сток углерода из растительности в почву за счет опада/отпада.

$$L = A_L (M_v + M_{v,0})
 \tag{11}$$

Коэффициент опада $A_L = A_v$. В свою очередь,

$$\frac{dM}{dt} = F_{land},
 \tag{12}$$

где $M = M_v + M_s$.

Численные эксперименты

С климатической моделью ИФА РАН и концептуальной моделью проведены идеализированные численные эксперименты при нулевых антропогенных эмиссиях CO_2 в атмосферу $E \equiv 0$ и отличном от нуля непарниковом радиационном возмущающем воздействии (НПРВВ), возникающем благодаря искусственному изменению значения солнечной постоянной. В реальности подобные изменения могут происходить, например, в результате изменений солнечной активности (с периодами от десятков до тысяч лет) или параметров орбиты Земли (с периодами от десятков тысяч до сотен тысяч лет). Внешний форсинг такого рода приводит к изменению климатических характеристик и практически не оказывает прямого воздействия на углеродный цикл. Исключением является отклик интенсивности фотосинтеза на изменение количества солнечной радиации, но обусловленная им прибавка к первичной продукции практически не влияет на полученные в работе результаты.

Поэтому можно считать, что изменения параметров углеродного цикла (в том числе, содержания CO_2 в атмосфере) при таком типе воздействия являются следствием изменений климата (в том числе, глобальной температуры). В дальнейшем, когда изменения составляющих углеродного цикла становятся достаточно велики, они начинают влиять на изменения климатических характеристик (напр., парниковый эффект), но при отсутствии последних отсутствовали бы и первые, в связи с чем можно говорить об однонаправленной причинно-следственной связи.

В описываемых численных экспериментах НПРВВ менялось по следующему закону:

$$R_X = R_{mn}(t) = \{ A_n \sin^m(\omega t), \text{ при } \omega t < \pi; 0 \text{ при } \omega t > \pi \}, \quad (13)$$

где $t \in (0, +\infty)$ - время, индексы $m = \{1, 2\}$, $n = \{1, 2\}$. Амплитуды A_1 и A_2 соответствуют увеличению солнечной постоянной на 1 и 2% относительно современного значения 1365 Вт/м^2 . Частота воздействия $\omega = 2\pi/P$, где P - период синуса. Вид функций $R_{mn}(t)$ показан на рис. 1а. С КМ ИФА РАН поставлены эксперименты при значениях $P = \{20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000\}$ лет. Расчеты с концептуальной моделью проведены при значениях P , меняющихся в пределах от 20 до 2000 лет с шагом 10 лет. Также с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью поставлен дополнительный численный эксперимент при более сложном внешнем воздействии, вид которого показан на рис. 1б.

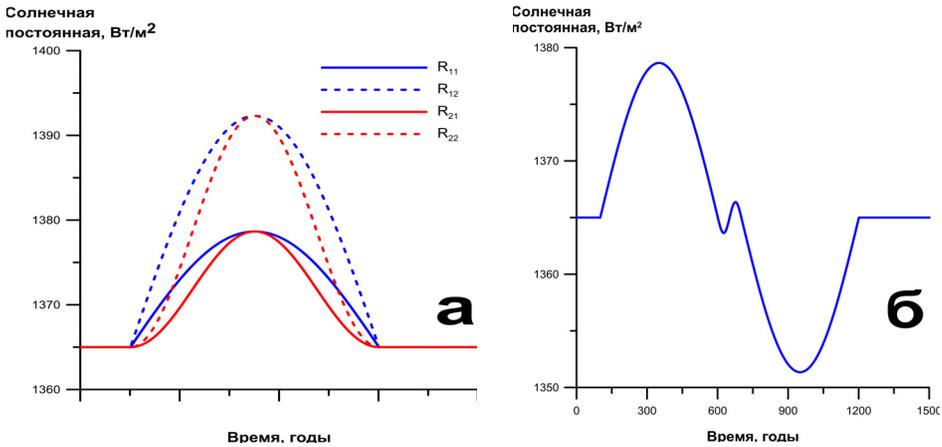


Рисунок 1. Непарниковое радиационное возмущающее воздействие (НПРВВ), используемое в работе

Анализировалось взаимное запаздывание ΔT_q между изменениями T и q . Величина ΔT_q определялась по максимуму коэффициента корреляции со сдвигом по времени между рядами T и q . Характерные значения максимального коэффициента корреляции составляют $\geq 0,99$. Результаты экспериментов с концептуальной моделью и климатической моделью ИФА РАН представлены на рис. 2. Картина взаимного запаздывания между изменениями q и T в случае внешнего воздействия конечной длительности подобна полученной в (Мурышев и др., 2015) и (Muryshev et al., 2017) для периодического воздействия: T может как отставать по фазе от q , так и опережать его в зависимости от вре-

менного масштаба внешнего воздействия $P = 2\pi/\omega$. При периодах P от года до сотен лет q запаздывает относительно T ($\Delta T_q > 0$), при периодах более пятисот лет T запаздывает относительно q ($\Delta T_q < 0$). Следует отметить, что при НПРВВ в виде $R_{m2}(t) = A_m \sin^2(\omega t)$ запаздывание q относительно T сменяется опережением при бóльшем значении критического периода P_{cr} , чем при НПРВВ в виде $R_{m1}(t) = A_m \sin(\omega t)$, хотя по порядку величины эти значения совпадают друг с другом (см. рис. 2). Зависимость ΔT_q от амплитуды внешнего воздействия сравнительно мала.

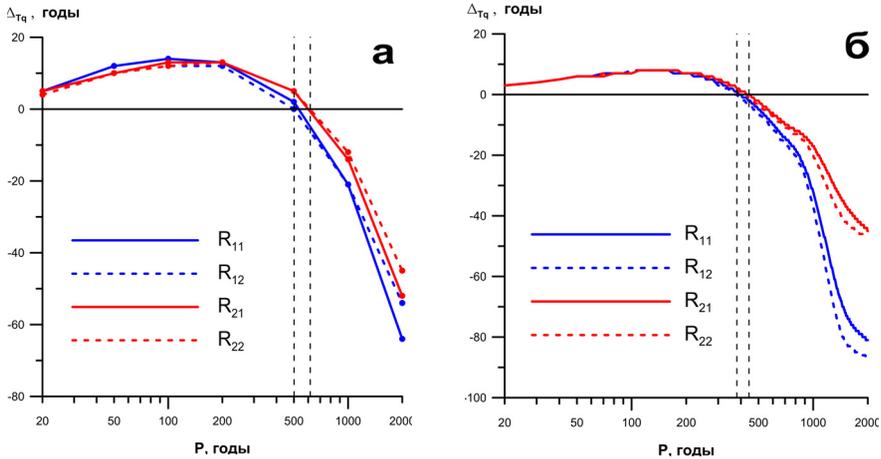


Рисунок 2. Зависимость запаздывания ΔT_q между изменениями аномалий глобальной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q от временного масштаба P внешнего воздействия в численных экспериментах с КМ ИФА РАН (а) и концептуальной моделью (б) при радиационном форсинге вида $R_{mn}(t)$
 $\Delta T_q > 0$ – T опережает q , $\Delta T_q < 0$ – опережает T . Пунктирными линиями отмечены временные масштабы воздействия P_{cr} , при которых запаздывание меняет знак

Обсуждение

Перейдем к объяснению того, почему при временном масштабе НПРВВ больше некоторого критического значения P_{cr} изменения глобальной температуры T запаздывают относительно изменений содержания CO_2 в атмосфере q , хотя являются причиной их возникновения (в этом разделе, как и при описании концептуальной модели, под T и q подразумеваются отклонения соответствующих величин от своих равновесных значений). При этом будем иметь в виду, что в случае внешнего воздействия в виде (7) или функции похожего вида с единственным максимумом переменные T и q также будут иметь по одному максимуму (если не брать во внимание малые колебания, обусловленные флуктуациями). Запаздывание T относительно q в этом случае проявляется, прежде всего, в том, что q достигает максимума раньше, чем T .

Простейший вариант концептуальной модели, в которой воспроизводится исследуемый эффект, получается в результате формальной линеаризации исходной концептуальной модели (при которой, в частности, исчезает зависимость от температуры потока CO_2 между океаном и атмосферой) и пренебрежения рядом процессов, второстепенных для данной задачи (аналитическое решение для более полной версии модели приведено в (Muryshev et al., 2017)).

В данной модификации поток CO_2 в океан пропорционален текущему значению отклонения содержания CO_2 в атмосфере от равновесного значения,

$$F_{oc} = bq \tag{14}$$

а поток CO_2 из атмосферы в наземные экосистемы определяется соотношением:

$$F_{land} = -aM - \gamma T \tag{15}$$

где M – соответствующее отклонение от равновесного значения запаса углерода в наземных экосистемах; a , b и γ – положительные константы. Тогда обмен углеродом в ЗКС описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dq}{dt} = -bq + aM + \gamma T \tag{16}$$

$$\frac{dM}{dt} = -aM - \gamma T \tag{17}$$

Если исключить M , получим уравнение для q :

$$q'' + (a + b)q' + abq = \gamma T' \tag{18}$$

где штрих обозначает дифференцирование по времени. Таким образом, в роли внешнего воздействия на q (выражение в правой части уравнения (18)) выступает формально не температура T , а ее производная T' .

Если функция $T(t)$ непрерывно дифференцируема и достигает максимума в точке $t = t_0$, то ее производная в этой точке равна нулю $T'(t_0) = 0$, а при $t < t_0$ производная $T'(t) > 0$. Следовательно, $T'(t)$ достигает максимума при $t < t_0$, то есть раньше, чем T .

Таким образом, возможна ситуация, когда q (в соответствии с интуитивными представлениями) достигает максимума позже, чем вызывающее его изменения внешнее воздействие T' , но раньше, чем T . Именно эта ситуация реализуется в нашем случае.

В частности, этим объясняется, почему в экспериментах, где НППВВ задается в виде разных степеней синуса, получается разное запаздывание при одних и тех же периодах воздействия: чем выше степень синуса, тем меньше при данном периоде воздействия P расстояние между максимумами T и T' , следовательно, тем больше будет запаздывание q относительно T , и для того, чтобы оно стало отрицательным, период P должен достичь большего значения.

Если предположить для простоты, что изменения T вследствие парникового эффекта CO_2 много меньше ее изменений вследствие НППВВ (что справедливо в рассматриваемом случае, так как антропогенные эмиссии CO_2 отсутствуют) и положить $T = T_0 \sin(\omega t)$, уравнение (18) может быть решено аналитически:

$$q(t) = \frac{\omega\gamma T_0}{a^2 + \omega^2} \left[\begin{aligned} & \frac{a}{a-b} \exp(-at) - \frac{b}{a-b} \left(\frac{a^2 + \omega^2}{b^2 + \omega^2} \right) \exp(-bt) + \\ & + \frac{1}{b^2 + \omega^2} (\omega(a+b)\sin(\omega t) - (\omega^2 - ab)\cos(\omega t)) \end{aligned} \right] \quad (19)$$

Если производная $\frac{dq}{dt}$ в точках в точках $t = \frac{\pi}{2\omega}k$ (где температура $T = T_0\sin(\omega t)$ достигает максимума) меньше нуля, то q убывает, а значит, достигает максимума раньше, чем T .

$$\begin{aligned} \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t = \frac{\pi}{2\omega}k} &= \frac{\omega\gamma T_0}{a^2 + \omega^2} \left[-\frac{a^2}{a-b} \exp\left(-\frac{a\pi k}{2\omega}\right) + \frac{b^2}{a-b} \left(\frac{a^2 + \omega^2}{b^2 + \omega^2} \right) \exp\left(-\frac{b\pi k}{2\omega}\right) + \right. \\ & \left. + \frac{\omega}{b^2 + \omega^2} (\omega^2 - ab) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

При $t \rightarrow \infty$ ($k \rightarrow \infty$) экспоненциальные слагаемые затухают, и ими можно пренебречь. Тогда q достигает максимума раньше T , если

$$\omega < \omega_{cr} = \sqrt{ab} \quad , \quad (21)$$

или, что то же, при периоде воздействия P , большем некоего критического значения P_{cr} :

$$P > P_{cr} = \frac{2\pi}{\sqrt{ab}} = 2\pi\sqrt{\tau_{land}\tau_{oc}} \quad (22)$$

где τ_{land} и τ_{oc} – времена релаксации наземной и океанической составляющих углеродного цикла соответственно.

При $k=1$, соответствующем первому максимуму синуса, что аналогично воздействию конечной длительности в виде (13), такое условие аналитически

сформулировать затруднительно. Но в этом случае производная $\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t = \frac{\pi}{2\omega}}$

может быть представлена в виде произведения положительного множителя

$\omega^2\gamma T_0$ и функции от двух безразмерных параметров $\alpha = \frac{a}{\omega}$ и $\beta = \frac{b}{\omega}$, знаком которой и определяется, запаздывает q относительно T , или опережает ее:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t = \frac{\pi}{2\omega}} &= \omega^2\gamma T_0 \left[-\frac{a^2}{(a-\beta)(1+a^2)} \exp\left(-\frac{\pi}{2}a\right) + \frac{\beta^2}{(a-\beta)(1+\beta^2)} \exp\left(-\frac{\pi}{2}\beta\right) + \right. \\ & \left. + \frac{1-a\beta}{(1+a^2)(1+\beta^2)} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

Можно показать, что при

$$\{\alpha > 1; \beta > 1\} \quad (24)$$

или, что то же, при

$$\{a > \omega; b > \omega\} \quad (25)$$

производная $\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=-\frac{\pi}{2\omega}} < 0$, то есть q достигает максимума раньше, чем T . Таким

образом, зависимость знака запаздывания между T и q от параметров модели в случае внешнего воздействия конечной длительности (формула (25)) аналогична соответствующей зависимости для случая периодического воздействия (формула (21)).

Сказанное позволяет сделать исследуемый эффект интуитивно понятным. Для этого необходимо объяснить, почему аномалия содержания CO_2 в атмосфере q достигает максимума и начинает убывать раньше, чем вызывающая ее аномалия температуры T .

При отсутствии внешних эмиссий CO_2 в атмосферу убывание или возрастание q зависит от соотношения потока углерода из наземных экосистем в атмосферу F_{land}^* и потока углерода из атмосферы в океан F_{oc} . При $F_{land}^* > F_{oc}$ q возрастает, при $F_{land}^* < F_{oc}$ q убывает. Предположим для простоты (как и в описанной выше линейной модели), что поток F_{land}^* зависит только от аномалии температуры T и аномалии содержания углерода в наземных экосистемах M : $F_{land}^* = F_{land}^*(M, T)$, причем он тем больше, чем больше

$$T \left(\frac{\partial F_{land}^*}{\partial T} > 0 \right), \text{ и тем меньше, чем меньше } M \left(\frac{\partial F_{land}^*}{\partial M} > 0 \right).$$

Увеличение T сначала приводит к интенсификации дыхания наземных экосистем (преимущественно гетеротрофного), что влечет за собой увеличение потока F_{land}^* и рост аномалии содержания CO_2 в атмосфере q . Запасы угле-

рода в наземных экосистемах при этом уменьшаются¹ $\left(\frac{dM}{dt} < 0 \right)$.

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:

$$\frac{dF_{land}^*}{dt} = \frac{\partial F_{land}^*}{\partial M} \frac{dM}{dt} + \frac{\partial F_{land}^*}{\partial T} \frac{dT}{dt} = 0 \quad (26)$$

Отсюда следует, что в момент, когда поток F_{land}^* начинает убывать, $\frac{dT}{dt} > 0$.

Иными словами, 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

¹Содержание углерода в растительности увеличивается, но оно компенсируется сильным уменьшением его запасов в почве

долго, чтобы F_{land}^* успел уменьшиться достаточно сильно, в какой-то момент F_{land}^* становится меньше F_{oc} . 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 M (см. рис. 3). По этой причине на этапе роста температуры поток CO_2 из атмосферы в океан не компенсирует потока из наземных экосистем в атмосферу, и содержание CO_2 в атмосфере начинает убывать уже после того, как начинает убывать температура.

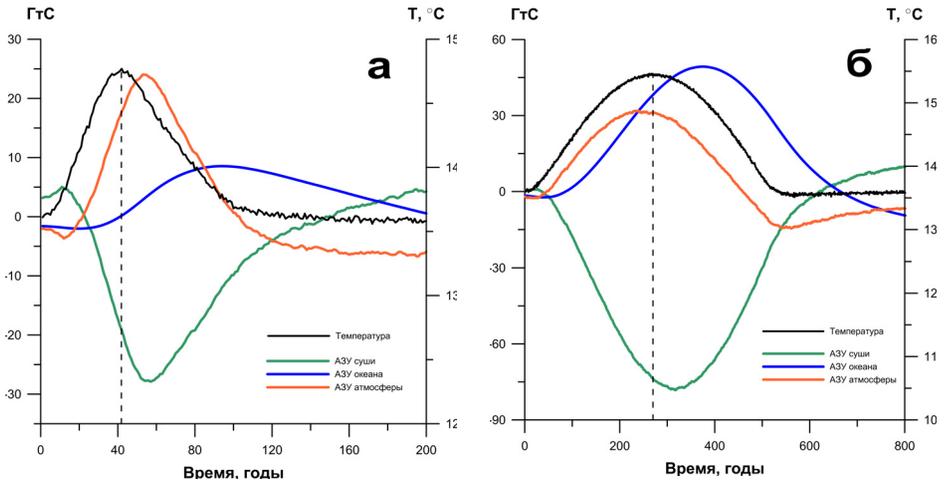


Рисунок 3. Зависимость от времени значений глобальной температуры (черная кривая) и аномалий запасов углерода (АЗУ) на суше (зеленая кривая), в океане (синяя кривая), в атмосфере (оранжевая кривая) в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при внешнем воздействии с временным масштабом $P = 100$ лет (а) и $P = 1000$ лет (б)

Пунктирными линиями отмечены моменты времени, когда температура достигает максимума

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

В частности, это означает, что при более сложной зависимости НПРВВ от времени, когда его медленные изменения чередуются с более быстрыми, вариации температуры могут то опережать вариации CO_2 (на участке быстрых изменений НПРВВ), то запаздывать относительно них (на участке его медленных изменений), во всех случаях оставаясь их первопричиной. Это проявляется в дополнительном эксперименте, поставленном с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью. Результаты по КМ ИФА РАН представлены на рис.4, результаты по концептуальной модели выглядят аналогично.

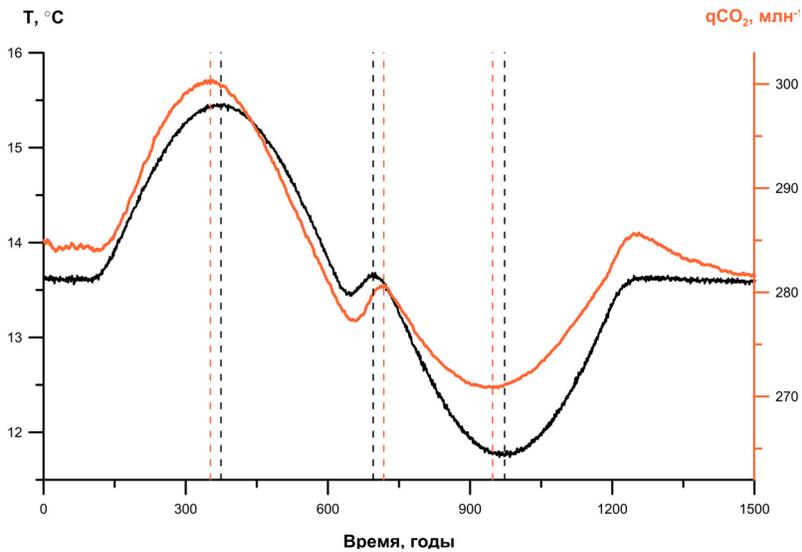


Рисунок 4. Зависимость от времени изменений глобальной температуры T (черная кривая) и содержания CO_2 в атмосфере qCO_2 (оранжевая кривая) в дополнительном численном эксперименте с КМ ИФА РАН.

Пунктирными линиями отмечены моменты времени, когда T и qCO_2 достигают локальных экстремумов. При медленно меняющемся НПРВВ изменения qCO_2 опережают изменения T , при быстро меняющемся НПРВВ изменения T опережают изменения qCO_2 .

Необходимо также отметить следующее. Поскольку увеличение температуры уменьшает растворимость углекислого газа в морской воде, естественно ожидать, что при потеплении климата океан будет выделять CO_2 , а не поглощать его, как в описанных выше экспериментах. Но из-за наличия в составе ЗКС наземных экосистем, температурная чувствительность которых значительно выше чувствительности океана (что проявляется, в частности, при формальной линейзации уравнений концептуальной модели) возникает противоположный эффект: на потепление климата реагируют в первую очередь почва и растительность, благодаря этому в атмосфере возникает положительная аномалия содержания CO_2 , а на нее уже реагирует океан, поглощая лишний углекислый газ из атмосферы.

Заключение

В настоящей работе обобщены результаты, полученные в (Мурышев и др., 2015) и (Muryshev et al., 2017). Описан возможный механизм взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q при внешнем воздействии на земную климатическую систему (ЗКС) в виде непарникового радиационного возмущающего воздействия (НПРВВ), не являющегося периодическим. Показано, что T может как отставать по фазе от q , так и опережать его в зависимости от временного масштаба НПРВВ, то есть фактически от скорости его изменения и времени, в течении которого эта скорость характерна. В частности, при медленных изменениях

НПРВВ, происходящих достаточно долго, изменения T отстают по фазе от изменений q , несмотря на то, что являются причиной их возникновения.

Этот результат является следствием того, что изменения q в ЗКС зависят не только от обусловленных внешним воздействием изменений T , но и от текущего содержания углерода в наземных экосистемах, при сильном уменьшении которого рост q становится невозможен. Аналогичные эффекты могут проявляться в любой системе, где изменения переменных зависят не только от внешнего воздействия, но и от неких внутренних лимитирующих факторов.

Исследуемый в данной работе эффект может быть объяснен также исходя из того, что при отсутствии внешних эмиссий CO_2 в ЗКС выполняется закон сохранения массы углерода, и на больших временных масштабах возрастает роль океанической части углеродного цикла (такое объяснение приводится в (Muryshev et al., 2017)). Тем не менее, эти предположения, хотя и приводят к тому же выводу, не являются необходимыми, поэтому рассуждение, предложенное в данной работе, представляется более общим.

Сказанное дает основания полагать, что подобный результат может быть получен в экспериментах с другими моделями, поскольку описанный эффект объясняется исходя из самых общих представлений о характере обмена углеродом в климатической системе. При этом в более сложных моделях могут возникать дополнительные эффекты, связанные с учетом факторов, которые в использованных моделях не учитывались.

Полученные результаты иллюстрируют невозможность в общем случае определить характер причинно-следственной связи между изменениями двух коррелирующих переменных по запаздыванию между ними без привлечения той или иной гипотезы о природе их взаимодействия.

Работа выполнена за счет Российского научного фонда (проект 14-17-00647-П).

Список литературы

Елисеев А.В. 2011. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 2, с.147-170.

Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Мохов И.И. 2009. Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 45, № 3, с.291-304.

Елисеев А.В., Сергеев Д.Е. 2014. Влияние подсеточной неоднородности растительности на расчёты характеристик углеродного цикла. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 50, №3, с. 259-270.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. 2014. Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO_2 в атмосферу. – Доклады АН, т. 459, № 4, с. 496-500.

Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. 2005а. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов и температурного режима атмосферы по палеореконструкциям для антарктической станции Восток. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 41, № 5. с. 579-592.

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. 2005b. Климатические изменения и их оценки с использованием климатической модели ИФА РАН. – Доклады АН, т. 402, № 2, с. 243-247.

Мохов И.И., Елисеев А.В. 2012. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP. – Доклады АН, т. 443, № 6, с. 732-736.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. 2009. Эмпирические оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на глобальную приповерхностную температуру. – Доклады АН, т. 426, № 5, с. 679-684.

Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. 2012. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений. – Доклады АН, т. 443, № 2, с. 225-231.

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

Andreae M., Jones C., Cox P. 2005. Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. – Nature, vol. 435(7046), pp. 1187-1190.

Bereiter B., Luthi D., Siegrista M., Schupbach S., Stocker T., Fischer H. 2012. Mode change of millennial CO₂ variability during the last glacial cycle associated with a bipolar marine carbon seesaw. – Proc. Nat. Acad. Sci, vol. 109(25), pp. 9755-9760.

Caillon N., Severinghaus J., Jouzel J., Barnola J.M., Kang J., Lipenkov V. 2003. Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across Termination. – Science, vol. 299(5613), pp. 1728-1731.

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.

Eliseev A. 2015. Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle. – Glob. Planet. Change, vol. 124, pp. 30-40.

Eliseev A., Mokhov I. 2007. 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., vol. 89(1-2), pp. 9-24.

Eliseev A., Mokhov I. 2011. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios. – Adv. Atmos. Sci., vol. 28(5), pp. 1215-1232.

Eliseev A., Mokhov I., Chernokulsky A. 2014. An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires. – *Biogeosciences*, vol. 11(12), pp. 3205-3223.

Ganopolski A., Petoukhov V., Rahmstorf S., Brovkin V., Claussen M., Eliseev A., Kubatzki C. 2001. CLIMBER-2: a climate system model of intermediate complexity. Part 11: model sensitivity. – *Clim. Dyn.*, vol. 17(10), pp. 735-751.

Ganopolski A., Roche D. 2009. On the nature of lead-lag relationships during glacial-interglacial climate transitions. – *Quat. Sci. Rev.*, vol. 28(27-28), pp. 3337-3361.

Hegerl G., Hasselmann K., Cubasch U., Mitchell J., Roeckner E., Voss R., Waszkewitz J. 1997. Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. – *Clim. Dyn.*, vol. 13, pp. 613-634.

Humlum O., Stordahl K., Solheim J.E. 2013. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature. – *Glob. Planet. Change*, vol. 100, pp. 51-69.

Idso S. 1998. CO₂-induced global warming: a skeptic's view of potential climate change. – *Clim. Res.*, vol. 10(1), pp. 69-82.

Jones G., Stott P., Christidis N. 2013. Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations. – *J. Geophys. Res., Atmospheres*, vol. 118(10), pp. 4001-4024.

Kern Z., Leuenberger M. 2013. Comment on “The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature” Humlum et al. [*glob. planet. change* 100: 51-69.]: isotopes ignored. – *Glob. Planet. Change*, vol. 109, pp. 1-2.

Lean J., Rind D. 2008. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35(18), L18701.

Lenton T. 2000. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model. – *Tellus B*, vol. 52(5), pp. 1159-1188.

Lindzen R. 1990. Some coolness concerning global warming. – *Bull. Amer. Met. Soc.*, vol. 71, pp. 288-299.

Masters T., Benestad R. 2013. Comment on “The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature”. – *Glob. Planet. Change*, vol. 106, pp. 141-142.

Miksovsky J., Holtanova E., Pisoft P. 2016. Imprints of climate forcings in global gridded temperature data. – *Earth, Syst. Dyn.*, vol. 7(1), pp. 231-249.

Millero F. 1995. Thermodynamics of carbon dioxide system in the ocean. – *Geophys. Cosmophys. Acta*, vol. 59(4), pp. 661-677.

Monnin E., Indermohle A., Dallenbach A., Flockiger J., Stauffer B., Stocker T., Raynaud D., Barnola J.M. 2001. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination. – *Science*, vol. 291(5501), pp. 112-114.

Muryshv K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Timazhev A.V. 2017. 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*, vol. 148, pp. 29-41.

Petoukhov V., Ganopolski A., Brovkin V., Claussen M., Eliseev A., Kubatzki K., Rahmstorf S. 2000. CLIMBER-2: a climate system model of intermediate complexity. Part I: model description and performance for present climate. – *Clim. Dyn.*, vol. 16(1), pp. 1-17.

Quinn J. 2010. *Global Warming. Geophysical Counterpoints to the Enhanced Greenhouse Theory.* – Dorrance Publ., Pittsburgh, 118 p.

Ribes A., Terray L. 2013. Application of regularised optimal fingerprint analysis for attribution. Part II: application to global near-surface temperature. – *Clim. Dyn.*, vol. 41(11-12), pp. 2837-2853.

Richardson M. 2013. Comment on “The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature” by Humlum, Stordahl and Solheim. – *Glob. Planet. Change*, vol. 107, pp. 226-228.

Scafetta N. 2012. Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the general circulation climate models. – *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, vol. 80, pp. 124-137.

Schmittner A., Saenko O., Weaver A. 2003. Coupling of the hemispheres in observations and simulations of glacial climate change. – *Quat. Sci. Rev.*, vol. 22(5-7), pp. 659-671.

Schonwiese C.D., Walter A., Brinckmann S. 2010. Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. an update. – *Meteorol. Zeitschrift*, vol. 19(1), pp. 3-10.

Sedlacek K., Knutti R. 2012. Evidence for external forcing on 20th-century climate from combined ocean atmosphere warming patterns. – *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39(20), L20708.

Shakun J., Clark P., He F., Marcott S., Mix A., Liu Z., Otto-Bliesner B., Schmittner A., Bard E. 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. – *Nature*, vol. 484(7392), pp. 49-54.

Smirnov D., Mokhov I. 2009. From Granger causality to long-term causality: application to climatic data. – *Phys. Rev. E*, vol. 80(1), 016208.

Soon W., Posmentier E., Baliunas S. 1996. Inference of solar irradiance variability from terrestrial temperature changes, 1880-1993: an astrophysical application of the sun-climate connection. – *Astrophys. J.*, vol. 472(2), pp. 891-902.

Stocker T., Johnsen S. 2003. A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. – *Paleoceanography*, vol. 18(4), p. 1087.

Stone D., Allen M., Selten F., Kliphuis M., Stott P. 2007. The detection and attribution of climate change using an ensemble of opportunity. – *J. Climate*, vol. 20(3), pp. 504-516.

Stone D., Allen M., Stott P., Pall P., Min S.K., Nozawa T., Yukimoto S. 2009. The detection and attribution of human influence on climate. – Annu. Rev. Energy Resour., vol. 34, pp 1-16.

Stott P., Tett S., Jones G., Allen M., Ingram W., Mitchell J. 2001. Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes. – Clim. Dyn., vol. 17(1), pp. 1-21.

Zhang Y., Yu G., Yang J., Wimberly M., Zhang X., Tao J., Jiang Y., Zhu J. 2014. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. – Glob. Ecol. Biogeogr., vol. 23(2), pp. 144-155.

Статья поступила в редакцию: 27.03.2017 г.

После переработки: 31.05.2017 г.