Возможные механизмы запаздывания между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере

Р. Е. Мурышев, ИФА РАН

Введение

Ранее было получено, что восстанавливаемые по данным ледовых кернов изменения глобальной приповерхностной температуры T в предыдущие эпохи в целом опережали изменения содержания углекислого газа в атмосфере q [1, 2]. Поскольку по интуитивным представлениям следствие не может опережать причину, этот факт иногда преподносится в качестве аргумента, опровергающего общепринятую концепцию современного глобального потепления, в которой последнее связывается с усилением парникового эффекта антропогенной природы.

В [3] запаздывание изменений q относительно изменений T было получено на основании анализа данных наблюдений для XX века. На этом основании в [3] также делался вывод, что изменения q не могут быть причиной изменений T, а значит, общепринятые представления о природе глобального потепления второй половины XX – начала XXI веков являются ошибочными.

В настоящей работе показывается, во-первых, что опережение-запаздывание между изменениями T и q зависит от типа внешнего воздействия на климатическую систему (радиационное возмущающее воздействие (РВВ) или внешние эмиссии CO_2 в атмосферу), вследствие чего запаздывание, характерное для доиндустриального периода, не может быть индикатором причинно-следственных связей между соответствующими изменениями в XX веке.

Во-вторых, существует множество систем, в которых изменения одной переменной, являющиеся следствием изменений другой переменной, опережают последние по фазе. В настоящей работе показывается, что подобная ситуация может реализоваться в земной климатической системе (ЗКС) на примере взаимного запаздывания между изменениями q и T, и описывается соответствующий механизм. В частности, было получено, что при медленно меняющемся РВВ (в случае синусоидального РВВ — с периодом более ≈500 лет), изменения T отстают по фазе от изменений q, несмотря на то, что являются их причиной.

Этот факт указывает, что на основании опережения-запаздывания между изменениями двух климатических характеристик, вообще говоря, нельзя делать вывод о характере причинно-следственной связи между ними без привлечения той или иной гипотезы о характере их взаимодействия.

Метод

Взаимное запаздывание между изменениями глобальной температуры T и содержания в атмосфере углекислого газа q исследуется при помощи климатической модели ИФА РАН [4-6] и концептуальной совместной модели климата-углеродного цикла, описанной в [7]. Кроме того, для линеаризованной и упрощенной версии концептуальной модели получены аналитические решения, позволяющие описать исследуемый эффект количественно.

С климатической моделью ИФА РАН проведены следующие численные эксперименты:

1. Воспроизведение исторического климата 1700-2005 гг. в соответствии с протоколом CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5 [8]), продолженное сценарием RCP 2.6 для 2006-2300 гг. В качестве внешних воздействий задавались: антропогенные эмиссии в атмосферу углекислого газа (CO_2), концентрации в атмосфере метана (CH_4) и закиси азота (N_2O), содержание сульфатных аэрозолей в тропосфере, изменение альбедо поверхности из-за землепользования, вариации потока солнечной энергии на верхней границе атмосферы, оптическая толщина стратосферных аэрозолей (характеризующая влияние на климат вулканических извержений). Сценарий RCP 2.6 выбран потому, что это единственный сценарий, предполагающий наличие максимума содержания CO_2 в атмосфере (в середине XXI века) с последующим его убыванием и соответствующего максимума глобальной температуры. По расстоянию между этими максимумами можно формально определить запаздывание между изменениями соответствующих величин (см. рис. 1, 2).

2. Эксперименты с идеализированным внешним воздействием в виде:

   1) нулевого РВВ и эмиссий CO_2 в атмосферу, изменяющихся по закону

      а) $E(t)=E_0 \sin(\omega_E t)$ при всех значениях t;

      б) $E(t)=E_0 \sin(\omega_E t)$ при $\omega_E t < \pi/2$, и нулевых при $\omega_E t > \pi/2$;

   2) нулевых эмиссий CO_2 и РВВ, изменяющегося по закону

      а) $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ при всех значениях t;

      б) $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ при $\omega_R t < \pi/2$, и нулевом при $\omega_R t > \pi/2$.

Эксперименты с КМ ИФА РАН проводились при периодах эмиссий $P_E = 2\pi / \omega_E$ и радиационного воздействия $P_R = 2\pi / \omega_R$ от 10 до 2000 лет.

Аналогичные расчеты с идеализированным внешним воздействием проведены также с концептуальной моделью при периодах внешнего воздействия от 10 до 10000 лет и различных значениях входящих в нее параметров, менявшихся в пределах известного на сегодняшний день диапазона неопределенности.

Анализировалось взаимное запаздывание Δ_{Tq} между изменениями T и q. Величина Δ_{Tq} определялась по расстоянию между максимумами T и q. Кроме того, применялся использовавшийся в [2, 3, 7] метод определения запаздывания по максимуму коэффициента корреляции со сдвигом по времени между рядами T и q и дополнительно между рядам их первых разностей. Характерные значения максимального коэффициента корреляции составляют ≥ 0,95.

Следует заметить, что при внешнем воздействии конечной длительности (1б, 2б) запаздывание, определенное по максимуму коэффициента корреляции, сильно зависит от длины коррелируемых рядов, т. е. от того, как долго продолжается эксперимент после прекращения внешнего воздействия. Поэтому в дальнейшем анализе результатов экспериментов 1б, 2б за основу были взяты запаздывания, полученные по расстоянию между максимумами T и q.

Результаты экспериментов

1. Запаздывание между изменениями q и T по данным эксперимента 'CMIP5' зависит от временного интервала, на котором оно исследуется. Так, в исторический период, когда антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу малы, ***T* опережает *q***. Это хорошо видно по запаздыванию между минимумами T и q, вызванными извержением вулкана Тамбора в 1815 г. и неизвестным извержением 1809 г. (см. рис. 1). Напротив, упомянутый выше максимум q в XXI веке опережает соответствующий максимум T (см. рис. 2). То есть в тот период, когда определяющим внешним воздействием являются эмиссии CO_2, ***q* опережает *T***.

2. Общая картина взаимного запаздывания между изменениями q и T в случае идеализированного внешнего воздействия конечной длительности одинакова в экспериментах с КМ ИФА РАН и концептуальной моделью и аналогична полученной в [7] для периодического воздействия.

В случае эмиссионного форсинга (1 а, б) T отстает по фазе от q при любых значениях параметров ($\Delta_{Tq} < 0$). При увеличении периода внешнего воздействия $P_E = 2\pi / \omega_E$ значение запаздывания Δ_{Tq} асимптотически стремится к величине, характеризующей термическую инерцию ЗКС (в экспериментах с концептуальной моделью – от 20 до 55 лет).

В случае радиационного форсинга (2 а, б) T может как отставать по фазе от q, так и опережать его в зависимости от периода внешнего воздействия $P_R = 2\pi / \omega_R$: при периодах РВВ от года до сотен лет ***q* запаздывает относительно *T*** ($\Delta_{Tq} > 0$), при периодах от 500 до

10000 лет ***T* запаздывает относительно *q*** ($\Delta_{Tq} < 0$). В экспериментах 2а (2б) значение критического периода P_{cr}, при котором запаздывание между T и q «меняет знак» в КМ ИФА РАН составляет ≈450 лет (≈500 лет), а в концептуальной модели – 300-370 лет (320-390 лет) в зависимости от значений входящих в нее параметров.

При увеличении периода внешнего воздействия $P_R = 2\pi / \omega_R$ значение запаздывания Δ_{Tq} асимптотически стремится к величине, определяющейся комбинацией параметров, характеризующих обмен углеродом между атмосферой, океаном и наземными экосистемами (в экспериментах с концептуальной моделью – от 50 до 120 лет).

Зависимость Δ_{Tq} от периода внешнего воздействия в экспериментах 1а и 2а приведена на рисунках 3, 4. Соответствующая зависимость в экспериментах 1б и 2б выглядит аналогично.

Обсуждение

Качественно эффект «отрицательного запаздывания» может быть объяснен следующим образом:

Увеличение температуры T сначала приводит к интенсификации дыхания почвы и растительности, что влечет за собой рост содержания CO_2 в атмосфере q и уменьшение запасов углерода в наземных экосистемах M (содержание углерода в растительности увеличивается, но оно компенсируется сильным уменьшением его запасов в почве). По мере уменьшения M, поток CO_2 в атмосферу из наземных экосистем начинает убывать. В тот момент, когда поток CO_2 из наземных экосистем уравновешивается потоком CO_2 из атмосферы в океан, зависящим в первую очередь от текущего содержания этого газа в атмосфере, q достигает максимума и начинает убывать, хотя температура T при этом может продолжать расти.

Математически эффект может быть описан при помощи простейшей линейной модели, получающейся в результате упрощения и линеаризации исходной концептуальной модели.

Пусть поток CO_2 в океан пропорционален текущему значению содержания CO_2 в атмосфере q,

$$F_{oc} = b\,q, \qquad (1)$$

а поток CO_2 в атмосферу из наземных экосистем определяется соотношением

$$F_{land} = a\,M + \gamma\,T, \qquad (2)$$

где M – запас углерода в наземных экосистемах; T – температура; a, b и γ – положительные константы. Тогда обмен углеродом в ЗКС описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dq}{dt} = -\,b\,q + a\,M + \gamma\,T, \qquad (3)$$

$$\frac{dM}{dt} = -\,a\,M - \gamma\,T\,. \qquad (4)$$

Если исключить M, получим уравнение для q:

$$q'' + (a+b)\,q' + ab\,q = \gamma\,T'\ . \qquad (5)$$

Таким образом, в роли внешнего воздействия на q формально выступает 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.

Если положить для простоты анализа $T = T_0 \sin(\omega t)$, уравнение (5) можно решить аналитически. Решение его выглядит следующим образом:

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

В случае установившихся колебаний (эксперименты с идеализированным воздействием 1а и 2а), пренебрегая затухающими экспоненциальными слагаемыми в решении, можно получить выражение для частоты внешнего воздействия ω_{cr}, при которой запаздывание между изменениями T и q «меняет знак»:

$$\omega_{cr} = (\,a \cdot b\,)^{1/2}\,. \qquad (6)$$

При $\omega > \omega_{cr}$ ***T* опережает *q***, а при $\omega < \omega_{cr}$ ***q* опережает *T***.

Если в формуле для потока CO_2 из атмосферы в океан учесть зависимость от текущего содержания углерода в океане D, вместо формулы (1) имеем:

$$F_{oc}^{*} = b\,q - k\,D, \qquad (7)$$

где k – некий положительный коэффициент.

Выражение для критической частоты в этом случае:

$$\omega_{cr}^{*} = [\,(a-k)\cdot b - k^2\,]^{1/2}\,. \qquad (8)$$

Соответственно, критический период воздействия

$$P_{cr}^{*} = 2\pi\,/\,\omega_{cr}^{*}\,. \qquad (9)$$

При реалистичных значениях параметров (a = 0,03 лет$^{-1}$, b = 0, 016 лет$^{-1}$, k = 0,006 лет$^{-1}$) $P_{cr}^{*} \approx 340$ лет, то есть соответствует тому, что было получено в численных экспериментах с

концептуальной моделью.

При воздействии конечной длительности (эксперименты с идеализированным воздействием 1б и 2б), когда экспоненциальными слагаемыми нельзя пренебречь, формулу для ω_{cr} получить проблематично, но можно, используя решение уравнения (5), показать на диаграмме зависимость знака производной $q'(t_0)$ в момент времени t_0, когда T достигает максимума, от соотношения параметров $\frac{a}{\omega}$ и $\frac{b}{\omega}$ (см. рис. 5). Если $q'(t_0) > 0$, ***T* опережает *q***, если $q'(t_0) < 0$, ***q* опережает *T***. Как видно из рисунка, зависимость опережения-запаздывания между T и q от параметров модели в случае периодического внешнего воздействия и воздействия конечной длительности в целом совпадает.

Выводы

Исследованы механизмы взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры T и содержания в атмосфере углекислого газа q. Показано, что опережение-запаздывание между изменениями T и q зависит от типа внешнего воздействия на климатическую систему (радиационное возмущающее воздействие (РВВ) или внешние эмиссии CO_2 в атмосферу) и его временного масштаба.

В случае эмиссионного форсинга T отстает по фазе от q вне зависимости от параметров внешнего воздействия, в случае радиационного форсинга T может как отставать по фазе от q, так и опережать его в зависимости от временного масштаба внешнего воздействия: в частности, при медленно меняющемся РВВ (в случае синусоидального РВВ — с периодом более ≈500 лет), изменения T отстают по фазе от изменений q, несмотря на то, что являются их причиной.

Предполагается, что подобный результат может быть получен в экспериментах и с другими моделями, поскольку обнаруженный 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. Например, если в упомянутой выше концептуальной модели учесть влияние метана (CH_4) на радиационный баланс, то при внешнем воздействии на ЗКС в виде синхронных эмиссий CO_2 и CH_4 с большим временным масштабом можно получить, что изменения температуры T опережают изменения q, хотя являются их следствием.

Указанные механизмы дают неожиданный с точки зрения интуитивных представлений результат на временных масштабах более 500 лет, однако это не означает, что на меньших временных масштабах фазовый сдвиг между изменениями двух

переменных является надежным индикатором причинно-следственной связи между ними: там могут быть свои механизмы, пока неизвестные.

Таким образом, на основании опережения-запаздывания между изменениями двух климатических характеристик, вообще говоря, нельзя судить о характере причинно-следственной связи между ними без привлечения той или иной гипотезы о характере их взаимодействия.

Литература

1. Climate change 2013: The Physical Science Basis. *Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., et al. (eds.).* Cambridge/New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
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. *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.
4. *Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V. et al.* The IAP RAS Global Climate Model. Moscow: Dialogue MSU, 1998. 110 p.
5. *Елисеев А.В., Сергеев Д.Е.* Влияние подсеточной неоднородности растительности на расчёты характеристик углеродного цикла // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 259-270.
6. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады Академии наук. 2012. Т.443. N.6. С.732-736
7. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажев А.В.* Взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // Доклады АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 708-712.

8. *Taylor K., Stouer R., Meehl G.* An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Met. Soc., 2012. 93 (4), P. 485-498.