

УДК 551.583

ВЗАИМНОЕ ЗАПАЗДЫВАНИЕ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ В ПРОСТОЙ СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА

© 2015 г. К. Е. Мuryшев, А. В. Елисеев,
член-корреспондент РАН И. И. Мохов, А. В. Тимажев

Поступило 17.04.2015 г.

Показано, что запаздывание изменений концентрации углекислого газа в атмосфере q относительно изменений глобальной приповерхностной температуры T , полученное по данным палеореко-струкций, воспроизводится в рамках общепринятых климатических моделей и не противоречит вы-водам о ключевой роли антропогенного парникового эффекта в современных изменениях климата. Также получено, что зависимость растворимости CO_2 в океане от температуры не меняет принци-пиальным образом взаимное запаздывание между q и T при внешнем воздействии на систему.

DOI: 10.7868/S0869565215240214

Определение роли естественных и антропо-генных факторов современных изменений кли-мата — одна из ключевых проблем XXI века. Цель данной работы — оценить, в какой степени о при-чинно-следственных связях в земной климатиче-ской системе (ЗКС) можно судить по временным сдвигам рядов данных, в частности, данных для температуры и содержания CO_2 в атмосфере.

По данным ледовых кернов, на основании ко-торых реконструируются изменения климата в плейстоцене, в частности ледниковые циклы, от-мечено общее запаздывание изменений содержа-ния углекислого газа в атмосфере q относительно изменений приповерхностной температуры T (см., например, [1–3]). Нередко отмеченное по палеоданным общее запаздывание q относительно T считается аргументом против утверждения, что современное глобальное потепление обуслов-лено парниковым эффектом антропогенного уве-личения q . При анализе данных наблюдений для 1980–2010 гг. в [4] также отмечено запаздывание q относительно T и на этом основании сделан вы-вод, что антропогенные эмиссии парниковых га-зов не являются причиной современного потеп-ления климата.

Следует отметить, что ледниковые циклы свя-зываются с изменениями параметров орбиты Земли — так называемыми циклами Миланкови-ча с характерными периодами около 100, 40 и 20 тыс. лет: в связи с орбитальными вариациями меняется климат (в частности, температура), а температурные изменения способствуют вари-ациям содержания в атмосфере парниковых газов. Последние, в свою очередь, влияют на темпера-турные изменения. Подобное может проявляться и при других радиационных возмущающих воз-действиях.

Вариации концентрации CO_2 в атмосфере мо-гут происходить, в том числе, за счет изменения растворимости этого газа в морской воде при из-менении температуры. При потеплении CO_2 вы-деляется в атмосферу из океана, и в этой связи увеличение концентрации CO_2 в атмосфере в XX в. иногда трактуется как следствие, а не как причина происходящего глобального потепле-ния.

В данной работе показано, что отмеченные взаимные запаздывания между изменениями температуры и концентрации углекислого газа в атмосфере не противоречат выводам о ключевой роли антропогенного парникового эффекта для современных изменений климата [1, 5]. В частно-сти, получено, что зависимость растворимости CO_2 в океане от температуры не меняет принци-пиальным образом взаимное запаздывание между q и T при внешнем воздействии на систему.

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

*Институт прикладной физики
Российской Академии наук, Нижний Новгород
E-mail: kmuryshhev@ifaran.ru*

Рассматривается глобально осредненная модель климата с углеродным циклом, учитывающая общепринятые механизмы влияния радиационного возмущающего воздействия (в том числе парникового) на состояние климата и взаимодействие между климатом и углеродным циклом:

$$\frac{dq}{dt} = E(t) - F_{oc} - F_{land}, \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = F_{oc}, \quad (2)$$

$$\frac{d(M_b + M_s)}{dt} = F_{land}, \quad (3)$$

$$C \frac{dT}{dt} = R_x \ln \left(1 + \frac{q}{q_0} \right) - \lambda T + R_T(t). \quad (4)$$

Здесь q – отклонение содержания CO_2 в атмосфере от начального (доиндустриального) значения $q_0 = 590$ Гт С (что соответствует концентрации 278 млн⁻¹); D – соответствующее отклонение запаса углерода в океане; M_b и M_s – соответствующие отклонения запаса углерода в растительности и почве соответственно; T – отклонение температуры; $E(t)$ – внешние (в том числе антропогенные) эмиссии CO_2 в атмосферу; F_{oc} – поток CO_2 из атмосферы в океан; F_{land} – поток CO_2 из атмосферы в наземные экосистемы; $C = 10^9$ Дж · м⁻² · К⁻¹ – теплоемкость единицы площади земной поверхности; $R_x = 5.3$ Вт/м² (соответствует радиационному возмущающему воздействию при удвоении содержания CO_2 в атмосфере, которое составляет 3.7 Вт · м⁻²), $\lambda = (0.8–2.5)$ Вт · м⁻² · К⁻¹ – коэффициент климатической чувствительности, $R_T(t)$ – радиационное возмущающее воздействие (РВВ).

Поток CO_2 из атмосферы в океан рассчитывается при помощи модели Бакастоу с буферным фактором, зависящим от температуры и содержания CO_2 в атмосфере [6, 7]:

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

где F_0 – коэффициент, определяемый из условия соответствия потока F_{oc} данным наблюдений для XX в. [1] при соответствующих граничных условиях для q и T ($F_0 = (2.5–4.5) \cdot 10^{-2}$ Гт С · год⁻¹); $\chi(T)$ – характеристика растворимости CO_2 в морской воде; ζ – буферный фактор, $D_0 = 1.5 \cdot 10^5$ Гт С.

Поток CO_2 из атмосферы в наземные экосистемы рассчитывается по схеме [8]

$$F_{land} = P - BR - SR, \quad (6)$$

где P – поглощение CO_2 за счет фотосинтеза, BR и SR – выделение CO_2 за счет автотрофного и ге-

теротрофного дыхания (дыхания растений и почвы) соответственно. В свою очередь,

$$P = A_p g_f(q) \theta_p^T, \quad (7)$$

$$BR = A_R M_b \theta_b^T, \quad (8)$$

$$SR = A_R M_s \theta_s^T, \quad (9)$$

где $A_p = 0.1818$ Гт С · год⁻¹, $A_R = 0.0909$ год⁻¹, $g_f(q)$ – функция, характеризующая процесс фертилизации наземной растительности углекислым газом атмосферы, $\theta_p = 1.04$, $\theta_b = 1.08$, $\theta_s = 1.09$ [9].

С моделью проведены численные эксперименты при различных значениях входящих в уравнения параметров и различных типах периодического воздействия:

1) периодических (синусоидальных) эмиссиях CO_2 в атмосферу $E(t) = E_0 \sin(\omega_E t)$ и нулевом РВВ $R_T(t) \equiv 0$;

2) периодическом (синусоидальном) РВВ $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ и нулевых эмиссиях CO_2 в атмосферу $E(t) \equiv 0$ (эти эксперименты подобны проанализированным в [10]);

3) периодическом (синусоидальном) РВВ $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ и экспоненциальных эмиссиях

CO_2 в атмосферу $E(t) = E_0 \exp \frac{t}{\tau_E}$. При этом типе

воздействия моделируется ситуация для последних десятилетий XX в.

Анализировалось взаимное запаздывание (фазовый сдвиг) Δ_{Tq} между изменениями T и q . Подобно [2, 4] величина Δ_{Tq} определялась по максимуму коэффициента корреляции со сдвигом по времени между рядами T и q , а также дополнительно между рядами их первых разностей ($q(i+1) - q(i)$) и ($T(i+1) - T(i)$), i – модельный год. Характерные значения максимального коэффициента корреляции для случаев 1) и 2) составляют не менее 0.95. В случае 3) эти значения несколько меньше, но также статистически значимы.

В случае 1) T отстает по фазе от q при любых значениях параметров ($\Delta_{Tq} < 0$) (рис. 1). При увеличении периода внешнего воздействия $P = \frac{2\pi}{\omega_E}$ значение запаздывания Δ_{Tq} асимптотически стремится к величине (23 года), характеризующей термическую инерцию ЗКС.

В случае 2) T может как отставать по фазе от q , так и опережать ее в зависимости от периода внешнего воздействия $P = \frac{2\pi}{\omega_R}$: при периодах РВВ от года до сотен лет q запаздывает относительно T ($\Delta_{Tq} > 0$), при периодах от сотен до десятков тысяч лет T запаздывает относительно q ($\Delta_{Tq} < 0$), при значениях периодов, приближающихся к сотням тысяч лет, снова отмечается запаздывание q относительно T , впрочем, незначительное по отношению к величине периода P (рис. 2).

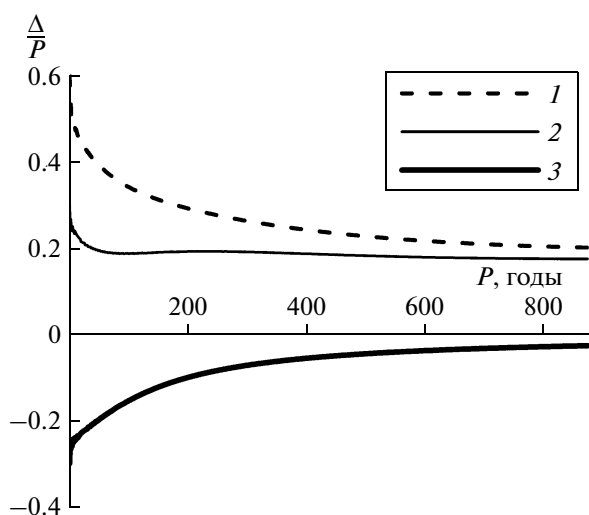


Рис. 1. Отношение запаздывания Δ изменений концентрации CO_2 в атмосфере относительно эмиссий CO_2 (1), изменений температуры относительно эмиссий CO_2 (2), изменений концентрации CO_2 в атмосфере относительно изменений температуры (3) к периоду внешних эмиссий P при периодических (синусоидальных) эмиссиях CO_2 в атмосферу в зависимости от периода эмиссий P .

Запаздывание q относительно T на разных временных масштабах проявлялось также в [10]. Однако запаздывание T относительно q на вековых и тысячелетних масштабах в [10] не проявлялось. Последнее может быть связано с менее детальным учетом характеристик инерционности наземного резервуара углерода в предлагаемой модели по сравнению с [10].

Следует отметить, что и по данным ледовых кернов при более детальном анализе наряду с общим запаздыванием изменений q относительно изменений T для ледниковых циклов, периоды которых оцениваются величиной около 100 тыс. лет, проявляются противоположные фазовые сдвиги для мод с периодами около 40 тыс. лет и менее [2, 3].

Для случая 2) были также проведены численные эксперименты, в которых при расчете потока CO_2 в океан (см. (5)) использовались фиксированные значения буферного фактора ζ и растворимости CO_2 в морской воде χ . Если пренебречь зависимостью от температуры растворимости и констант других химических реакций, участвующих в неорганическом карбонатном цикле океана, качественно проявление взаимного запаздывания не меняется. Это согласуется с выводами о доминирующей роли антропогенных эмиссий в накоплении CO_2 в атмосфере в современный период в связи с выделением этого газа океаном при потеплении.

В случае 3) фазовый сдвиг определялся только по коэффициенту корреляции между рядами пер-

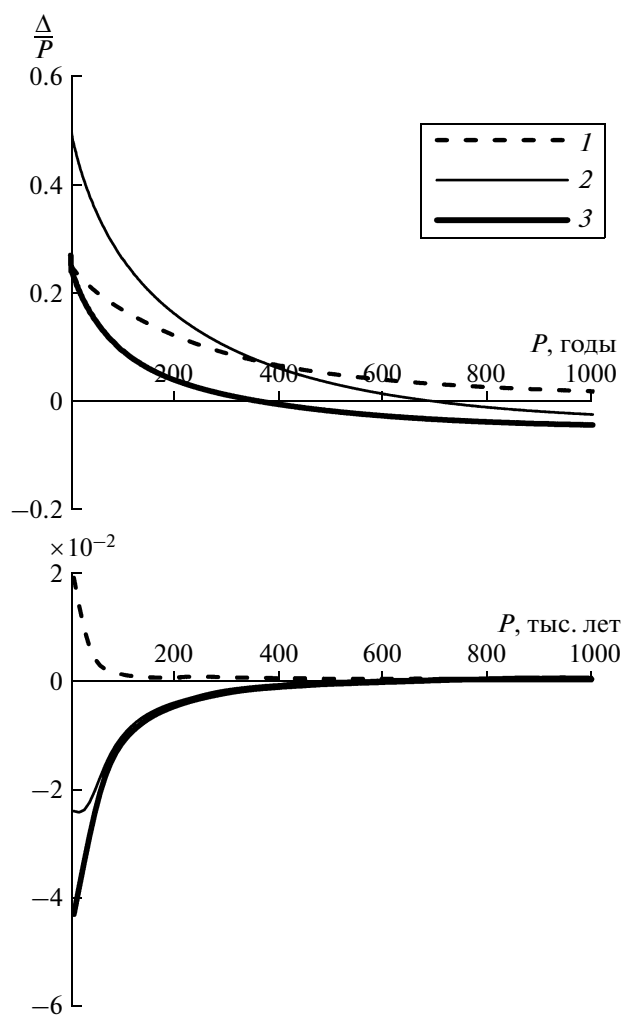


Рис. 2. Отношение запаздывания изменений концентрации CO_2 в атмосфере относительно РВВ (1), изменений температуры относительно РВВ (2), изменений концентрации CO_2 в атмосфере относительно изменений температуры (3) к периоду РВВ P при периодическом (синусоидальном) РВВ в зависимости от периода РВВ P на разных временных масштабах.

вых разностей, поскольку коэффициент корреляции между рядами q и T не имеет ярко выраженного максимума (на протяжении всего численного эксперимента происходит рост q и T с наложенными на него малыми колебаниями, обусловленными периодическим радиационным форсингом). При этом проявление взаимного запаздывания аналогично отмеченному для случая 2).

Полученный результат может быть обобщен на широкий класс периодических воздействий (в частности, с разложением в ряд Фурье). Следует отметить, что значение периода внешнего воздействия на систему P , при котором запаздывание Δ_{Tq} меняет знак, вообще говоря, зависит от его формы как функции времени, поскольку у

каждой гармонике (моды) свой собственный фазовый сдвиг.

Таким образом, можно сделать вывод, что при потеплении климата в результате эмиссий CO₂ запаздывание между изменениями глобальной температуры и концентрации CO₂ в атмосфере, определяемое по максимуму коэффициента корреляции их первых разностей (как делалось, например, в [4]), целиком определяется радиационным форсингом. Это означает, в частности, что описанный в [4] эффект запаздывания изменений концентрации CO₂ относительно изменений глобальной температуры не является достаточным основанием для утверждения, что первые не являются причиной вторых, и результаты, полученные в [4], не противоречат выводам об антропогенной природе современного глобального потепления [1].

Полученные нами результаты могут быть объяснены при рассмотрении линеаризованной исходной модели:

$$\frac{dq}{dt} = (\beta_{oc} + \beta_{land}) + \alpha D + A_R M + \gamma T + E(t), \quad (10)$$

$$\frac{dD}{dt} = -\beta_{oc} q - \alpha D, \quad (11)$$

$$\frac{dM}{dt} = -\beta_{land} q - A_R M - \gamma T, \quad (12)$$

$$\frac{dT}{dt} = Rq + \nu T + R_T(t). \quad (13)$$

Здесь

$$\beta_{oc} = -F_0, \quad \beta_{land} = -A_p g'_g(q_0),$$

$$\alpha = \zeta(T_0, q_0) \frac{q_0}{D_0}, \quad M = M_b + M_s,$$

$$\gamma = -(2\theta_p - \theta_b - \theta_s), \quad R = \frac{R_x}{Cq_0}, \quad \nu = -\frac{\lambda}{C}.$$

Аналитически могут быть получены выражения для Δ_{Tq} , имеющие разный знак при различных значениях входящих в уравнения параметров, в частности, при различных периодах внешнего воздействия P .

При $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ и $E(t) \equiv 0$ (случай 2)) решение системы (10)–(13) находим в виде

$$q = q_s \sin(\omega_R t + \varphi_q), \quad (14)$$

$$T = T_s \sin(\omega_R t + \varphi_T), \quad (15)$$

а при $R_T(t) = R_0 \sin(\omega_R t)$ и $E(t) = E_0 \exp\left(\frac{t}{\tau_E}\right)$ (случай 3)) – в виде

$$q = q_e \exp\left(\frac{t}{\tau_E}\right) + q_s \sin(\omega_R t + \varphi_q), \quad (16)$$

$$T = T_e \exp\left(\frac{t}{\tau_E}\right) + T_s \sin(\omega_R t + \varphi_T). \quad (17)$$

Здесь φ_q – фазовый сдвиг q относительно $R_T(t)$, φ_T – фазовый сдвиг T относительно $R_T(t)$, а $\Delta_{Tq} = \varphi_T - \varphi_q$. Изменения решения при экспоненциальных эмиссиях связаны с аperiодическими слагаемыми $q_e \exp\left(\frac{t}{\tau_E}\right)$ и $T_e \exp\left(\frac{t}{\tau_E}\right)$, которые существенным образом не влияют на значение запаздывания, определяемое по максимуму коэффициента корреляции. В вырожденном случае $\tau_E = \infty$, соответствующем постоянным эмиссиям, выражения для первых разностей q и T в случаях 2) и 3) совпадают между собой. Этим объясняется аналогичное проявление взаимного запаздывания изменений q и T для случаев 2) и 3).

Можно показать (если пренебречь зависимостью F_{oc} от D), что при

$$\omega < \omega_0 = (\beta_{oc} \nu)^{1/2} \quad (18)$$

$\varphi_q > 0$, т.е. изменения q опережают по фазе вызывающий их радиационный форсинг (для реалистичных значений β_{oc} и ν величина $\frac{2\pi}{\omega_0}$ порядка нескольких сотен лет). Качественно это согласуется с результатами численных экспериментов (рис. 2).

Следует отметить, что взаимное запаздывание между анализируемыми переменными определяется как причинно-следственными связями между ними, так и временными масштабами, связанными с этими переменными [11]. В рассмотренной модели наряду с временными масштабами внешних воз-

действий $\left(\frac{2\pi}{\omega_R}, \frac{2\pi}{\omega_E} \text{ и } \tau_E\right)$ можно также выделить временные масштабы, один из которых связан с термической инерционностью ЗКС и может быть оценен как $\tau_T = \nu^{-1} = \frac{C}{\lambda} \sim 30$ лет, второй – с откликом содержания CO₂ в атмосфере на внешние воздействия, который равен $\tau_q = (\beta_{oc} + \beta_{land})^{-1}$ (около 30 лет для океанического резервуара и около 10 лет для наземного), а также временной масштаб, связанный со взаимодействием климата и углеродного цикла и равный $\tau_s = 2\pi [(\beta_{oc} + \beta_{land})\nu]^{-1/2}$, т.е. порядка нескольких сотен лет. Масштаб термической инерционности τ_T характеризует асимптотическое значение Δ_{Tq} при антропогенных эмиссиях CO₂ в атмосферу с большим (относительно τ_T) периодом $P = \frac{2\pi}{\omega_E}$. Асимптотическое значение Δ_{Tq} в случае внешнего радиационного возмущения может быть оценено суммарным запаздыванием, связанным с τ_T и τ_q .

Следует отметить, что в рассматриваемой модели при РВВ с периодами порядка 1000 лет и более знак Δ_{Tq} меняется также в зависимости от знака параметра $\gamma = -(2\theta_p - \theta_b - \theta_s)$, который, в свою

очередь, может меняться при малом изменении параметров θ_p , θ_b , θ_s . Это означает, что интерпретация знака запаздывания между изменениями q и T , получаемого по данным наблюдений, зависит от знака γ . По смыслу γ – это параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом ($\gamma > 0$ означает, что потепление климата способствует росту концентрации CO_2 в атмосфере). В большинстве современных моделей эта обратная связь положительная [12] и в данной работе рассматривался только случай $\gamma > 0$.

Таким образом, показано, что запаздывание изменений концентрации углекислого газа в атмосфере q относительно изменений глобальной приповерхностной температуры T , полученное по данным палеореконокструкций, также воспроизводится в рамках общепринятых климатических моделей и не противоречит выводам о ключевой роли антропогенного парникового эффекта в современных изменениях климата. Также получено, что изменения q могут как запаздывать относительно изменений T , так и опережать их в зависимости от типа внешнего воздействия на ЗКС (радиационного возмущающего воздействия или внешних эмиссий CO_2 в атмосферу), периода этого воздействия и характеристик обратной связи между климатом и углеродным циклом.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ (соглашение 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13–05–00652, 14–05–31163, 14–05–00639), а также программ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis / T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. Eds. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
2. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.
3. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. / В кн.: Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 312–319.
4. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.-E. // Glob. Planet Change. 2013. V. 100. P. 51–69.
5. Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. // ДАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231.
6. Meier-Reimer E., Hasselmann K. // Clim. Dyn. 1987. V. 2. № 2. P. 63–90.
7. Mokhov I.I., Eliseev A.V. // Carbon Balance and Management. 2008. V. 3. № 4.
8. Eliseev A.V., Mokhov I.I. // Theor. Appl. Climatol. 2007. V. 89. № 1/2. P. 9–24.
9. Lenton T.M. // Tellus. 2000. V. 52B. № 5. P. 1159–1188.
10. Willeit M., Ganopolski A., Dalmonch D., et al. // Clim. Dyn. 2014. V. 42. № 7–8. P. 1699–1713.
11. Ganopolski A., Roche D.M. // Quart. Sci. Rev. 2009. V. 28. № 27/28. P. 3361–3378.
12. Boer G.J., Arora V.K. // J. Climate. 2013. V. 26. № 10. P. 3326–3341.