

=====МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ=====
===== «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ»=====

УДК: 577.3

Константа климатической чувствительности в глобальных моделях: перенормировка с учетом обратной связи и численные оценки на основе палеоклиматических данных

©2012 Карнаухов А.В. *, Карнаухова Е.В. *

Институт биофизики клетки, Российская академия наук, Пущино, Московская область, 142290, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены соотношения между ключевыми параметрами глобальных экологических моделей разной степени детальности. Показано, что учет положительной обратной связи «среднепланетарная температура» - «повышение концентрации паров воды в атмосфере» приводит не только к росту перенормированной константы равновесной климатической чувствительности, но и к увеличению константы тепловой инерции. При этом константа эффективной климатической чувствительности меняется в меньшей степени, что затрудняет идентификацию параметров модели на основе данных инструментальных наблюдений. В этой связи представляют интерес сопоставление численного значения равновесной суммарной климатической чувствительности Земли, полученного на основе теоретических расчетов, и соответствующих оценок, сделанных на основе анализа палеоклиматических данных, полученных с использованием химического и изотопного анализа ледяных кернов двух антарктических станций – «Восток» и «Купол С». Показано хорошее соответствие результатов теоретических расчетов и анализа палеоклиматических данных.

Ключевые слова: климатическая чувствительность, перенормировка параметров, положительная обратная связь, парниковый эффект, радиационно-адиабатическая модель, палеоклимат, антарктические станции «Восток» и «Купол С».

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных задач глобального моделирования в экологии является установление количественных параметров зависимости между наблюдаемым изменением концентрации углекислого газа в атмосфере $\rho_{CO_2}(t)$ и среднепланетарной температурой Земли $T(t)$. Задача выходит за рамки традиционных задач физики атмосферы, поскольку изменение среднепланетарной температуры влияет на весь геобиосферный комплекс явлений, определяющих химический состав атмосферы и, в частности, концентрацию парниковых газов, среди которых особую роль играют пары воды, дающие наибольший вклад (85-95%) в абсолютный парниковый эффект, наблюдаемый в настоящее время (около 35⁰К).

В общем случае зависимость среднепланетарной температуры Земли от каких-либо параметров геобиосферы принято называть климатической чувствительностью [1]. В настоящей статье мы рассматриваем климатическую чувствительность как зависимость

*AlexeyKarnaukhov@yandex.ru

изменения среднепланетарной температуры $\Delta T(t)$ от изменения концентрации углекислого газа $\Delta \rho_{CO_2}(t)$. В этом случае иногда говорят о «климатической чувствительности к изменению концентрации CO_2 ». Поскольку иных видов климатической чувствительности мы здесь рассматривать не будем, термин «климатическая чувствительность», будет подразумевать, что речь идет о климатической чувствительности именно к изменению концентрации CO_2 .

Вместе с тем, даже в рамках этого частного случая можно дать определения для, как минимум, четырех различных типов констант климатической чувствительности, каждая из которых будет параметризовать некоторую физически значимую модель. Дадим кратко эти определения:

1. Константа первичной климатической чувствительности σ_{CO_2} для стационарного случая определяется следующим образом:

$$\sigma_{CO_2} = \frac{\partial \Delta T(\Delta l_{CO_2}, \Delta l_{H_2O}, \Delta A, \dots)}{\partial \Delta l_{CO_2}}, \quad (1)$$

где $\Delta T(\Delta l_{CO_2}, \Delta l_{H_2O}, \Delta A, \dots)$ - функция, выражающая зависимость стационарной величины изменения среднепланетарной температуры от изменения параметров

геобиосферы: $\Delta l_{CO_2} = \ln\left(\frac{\rho_{CO_2} + \Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}\right) \cong \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}$ - относительная величина изменения

концентрации CO_2 , $\Delta l_{H_2O} = \ln\left(\frac{\rho_{H_2O} + \Delta \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}\right) \cong \frac{\Delta \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$ - относительная величина

изменения концентрации паров воды в атмосфере, $\Delta A, \dots$ - изменение альбедо и другие параметры.

Данная константа используется в моделях, которые связывают изменение глобальной температуры с изменением лишь одного параметра – концентрации CO_2 . Все остальные параметры - фиксированы. Такого типа упрощения оправданы, например, для задачи компьютерного моделирования распространения излучения и тепловых потоков в атмосфере.

2. Перенормированная константа климатической чувствительности σ'_{CO_2} для стационарного случая с учетом зависимости концентрации паров воды в атмосфере от среднепланетарной температуры будет определяться из следующего соотношения :

$$\sigma'_{CO_2} = \frac{\partial \Delta T(\Delta l_{CO_2}, \Delta l_{H_2O}, \Delta A, \dots)}{\partial \Delta l_{CO_2}} + \frac{\partial \Delta T(\Delta l_{CO_2}, \Delta l_{H_2O}, \Delta A, \dots)}{\partial \Delta l_{H_2O}} \cdot \frac{\partial \Delta l_{H_2O}}{\partial \Delta T} \cdot \sigma'_{CO_2}. \quad (2)$$

Могут быть рассмотрены и другие виды перенормированных констант при исследовании других видов зависимостей, имеющих характер обратных связей. Случай паров воды интересен, во-первых, поскольку для него удалось построить строгое аналитическое решение [2], а, во-вторых, полученные теоретически численные значения σ'_{CO_2} оказываются близки к значениям климатической чувствительности, полученным из анализа палеоклиматических данных. Еще одним важным аспектом здесь является необходимость перенормировки времени релаксации климатической системы при учете обратных связей.

3. Константа суммарной климатической чувствительности σ для стационарного случая:

$$\sigma = \frac{d\Delta T(\Delta l_{CO_2}, \Delta l_{H_2O}, \Delta A, \dots)}{d\Delta l_{CO_2}} \quad (3)$$

строится аналогично (2), но учитывает все возможные параметры и обратные связи. Именно эта константа наиболее близка к реально наблюдаемым значениям стационарной климатической чувствительности. Тот факт, что учет только положительной обратной связи, обусловленной парами воды, уже дает хорошее соответствие с наблюдаемыми величинами, говорит о лидирующей роли данного фактора. Что, впрочем, не отменяет актуальности теоретических исследований роли других факторов в формировании константы суммарной климатической чувствительности.

4. Эффективная константа климатической чувствительности $\tilde{\sigma}$ для нестационарного случая экспоненциального роста концентрации CO_2 и среднепланетарной температуры:

$$\tilde{\sigma} = \left(\frac{d\Delta T(t)}{dt} / \frac{d\Delta l_{CO_2}(t)}{dt} \right), \quad (4)$$

используется при анализе актуальных климатических изменений. Особо отметим, что адекватность соответствующих моделей обусловлена и ограничена периодами экспоненциального роста соответствующих величин.

Подводя промежуточный итог, сформулируем цель настоящей статьи – проанализировать соотношение между различными типами констант климатической чувствительности и предложить самосогласованный набор ключевых параметров глобальных моделей, определяющих изменение среднепланетарной температуры.

ПЕРЕНОРМИРОВКА КОНСТАНТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ ПРИ УЧЕТЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ

Можно показать, что для стационарного случая без учета обратных связей зависимость изменения среднепланетарной температуры $\Delta T(t)$ от изменения концентрации углекислого газа $\Delta \rho_{CO_2}(t)$ будет иметь следующий вид [2, 3, 4]:

$$\Delta T(t) = \sigma_{CO_2} \cdot \ln \left(\frac{\rho_{CO_2} + \Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} \right), \quad (5)$$

где σ_{CO_2} - константа климатической чувствительности к изменению концентрации углекислого газа. Или для малых $\Delta T(t)$:

$$\Delta T(t) = \sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}. \quad (6)$$

С учетом тепловой инерции океанов а, также, с учетом наличия положительной обратной связи: «среднепланетарная температура» - «повышение концентрации паров воды в атмосфере», $\Delta T(t)$ будет определяться уже системой уравнений. Первое из них описывает тепловую инерцию в рамках стандартной релаксационной модели [2, 4, 5], а также учитывает зависимость среднепланетарной температуры от изменения

концентрации паров воды $\Delta\rho_{H_2O}(t)$ [6], где σ_{H_2O} - константа климатической чувствительности к изменению концентрации паров воды, а второе - изменение концентрации водяных паров в атмосфере Земли как функцию изменения среднепланетарной температуры:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \cdot \frac{\Delta\rho_{H_2O}(t)}{\rho_{H_2O}} - \Delta T(t) \right); \quad (7a)$$

$$\Delta\rho_{H_2O}(t) = \varepsilon\rho_{H_2O}\Delta T(t), \quad (7б)$$

где τ - время релаксации, определяемое тепловой инерцией, а ε - параметр, описывающий зависимость изменения концентрации паров воды $\Delta\rho_{H_2O}(t)$ от изменения среднепланетарной температуры $\Delta T(t)$. Уравнение (7б) является следствием естественного предположения о постоянстве среднепланетарной относительной влажности в условиях изменения среднепланетарной температуры и уравнения Больцмана применительно к насыщенным водяным парам.

Нетрудно показать, что систему уравнений (7) можно упростить, подставив значение концентрации паров воды из второго уравнения системы (7б) в первое (7а):

$$\begin{aligned} \frac{dT(t)}{dt} &= \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \cdot \frac{\varepsilon\rho_{H_2O}\Delta T(t)}{\rho_{H_2O}} - \Delta T(t) \right) = \\ &= \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \cdot \varepsilon \cdot \Delta T(t) - \Delta T(t) \right) = \\ &= \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - (1 - \sigma_{H_2O} \cdot \varepsilon) \cdot \Delta T(t) \right) = \\ &= \frac{(1 - \sigma_{H_2O} \cdot \varepsilon)}{\tau} \cdot \left(\frac{\sigma_{CO_2}}{(1 - \sigma_{H_2O} \cdot \varepsilon)} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - \Delta T(t) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

С использованием перенормированных величин σ'_{CO_2} и τ' уравнение (8) примет следующий вид:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - \Delta T(t) \right) \quad (9)$$

При этом перенормированные величины как климатической чувствительности σ'_{CO_2} , так и тепловой инерции τ' будут зависеть от коэффициента положительной обратной связи k :

$$\tau' = k\tau; \sigma'_{CO_2} = k\sigma_{CO_2}, \text{ где } k = \frac{1}{(1 - \varepsilon\sigma_{H_2O})}. \quad (10)$$

Уравнение (9) допускает квазистационарное приближение в том случае, когда параметр, описывающий характерное время изменения концентрации углекислого газа τ_{CO_2} , много больше перенормированного времени релаксации системы $\tau_{CO_2} \gg \tau'$:

$$\Delta T(t) = \sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}. \quad (11)$$

Отметим, что уравнение (11) по форме совпадает с уравнением (6), отличаясь только перенормированным значением константы климатической чувствительности σ'_{CO_2} , однако принципиальное различие состоит в том, что уравнение (11) описывает уже 2-х компонентный парниковый эффект ($CO_2 + H_2O$).

Еще одним частным случаем релаксационной модели (9) будет случай, когда изменение концентрации CO_2 будет происходить по экспоненциальному закону:

$$\Delta \rho_{CO_2}(t) = \Delta \rho_{CO_2}(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right). \quad (12)$$

Изменение температуры $\Delta T(t)$, описываемое уравнением (9), также будет происходить по экспоненциальному закону с тем же показателем экспоненты:

$$\Delta T(t) = \Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right). \quad (13)$$

Убедимся в этом, и найдем связь величин $\Delta T(t)$ и $\Delta \rho_{CO_2}(t)$. Для этого подставим (12)

и (13) в (9) с учетом $\frac{dT(t)}{dt} = \frac{d\Delta T(t)}{dt}$:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{dT(t)}{dt} &= \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - \Delta T(t) \right) \\ \Rightarrow \frac{d\Delta T(t)}{dt} &= \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - \Delta T(t) \right) \quad (14) \\ \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) \right) &= \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t_0)}{\rho_{CO_2}} \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) - \Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) \right) \\ \Rightarrow \frac{1}{\tau_{CO_2}} \cdot \Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) &= \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t_0)}{\rho_{CO_2}} \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) - \Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) \right) \\ \Rightarrow \left(\frac{1}{\tau_{CO_2}} + \frac{1}{\tau'} \right) \cdot \Delta T(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) &= \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t_0)}{\rho_{CO_2}} \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau_{CO_2}}\right) \right). \end{aligned}$$

Или снова возвращаясь к $\Delta T(t)$ и $\Delta \rho_{CO_2}(t)$ (12), (13):

$$\left(\frac{1}{\tau_{CO_2}} + \frac{1}{\tau'} \right) \cdot \Delta T(t) = \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} \right), \quad (15)$$

получим окончательно:

$$\Delta T(t) = \left(\frac{\tau_{CO_2}}{\tau_{CO_2} + \tau'} \right) \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} \right) \quad (16)$$

Этот частный случай весьма важен, поскольку изменение концентрации CO_2 за последние 200 лет, вызванное антропогенной деятельностью, хорошо описывается экспоненциальным законом. В этом случае уравнение (17):

$$\Delta T(t) = \tilde{\sigma}_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{CO}_2}(t)}{\rho_{\text{CO}_2}} \quad (17)$$

также (как и уравнение (11)) принимает форму, аналогичную уравнению (6), но константа эффективной климатической чувствительности $\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2}$ будет зависеть уже не только от коэффициента k , но и от параметров τ' и τ_{CO_2} :

$$\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2} = \frac{\tau_{\text{CO}_2}}{\tau_{\text{CO}_2} + \tau'} \sigma'_{\text{CO}_2} = \frac{\tau_{\text{CO}_2}}{\tau_{\text{CO}_2} + k\tau} k\sigma_{\text{CO}_2}. \quad (18)$$

Как мы видим, более детальное рассмотрение модели и учёт дополнительных параметров приводит к появлению трех различных величин климатической чувствительности: первичной σ_{CO_2} , перенормированной σ'_{CO_2} и эффективной $\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2}$.

Представляется важным привести приближенные оценки обсуждаемых параметров и кратко указать источники получения этих оценок:

1. $\sigma_{\text{CO}_2} \approx 3.7^\circ \text{K}$ (2.5°K – для $2\times\text{CO}_2$) – модельные численные расчеты [1];
2. $\tau \approx 20$ лет – аналитические оценки с учетом влияния поверхностных и промежуточных вод Мирового океана [4];
3. $\sigma'_{\text{CO}_2} \approx 37^\circ \text{K}$ – радиационно-адиабатическая модель [2, 3];
4. $\tau_{\text{CO}_2} \approx 45$ лет – инструментальные наблюдения [1];
5. $\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2} \approx 6.7^\circ \text{K}$ (4.5°K – для $2\times\text{CO}_2$) – инструментальные наблюдения [1].

Отметим самосогласованность полученных оценок. Так, из соотношения (10) с учетом $\sigma_{\text{CO}_2} \approx 3.7^\circ \text{K}$ и $\sigma'_{\text{CO}_2} \approx 37^\circ \text{K}$ можно оценить коэффициент положительной обратной связи $k \approx 10$ и перенормированную величину тепловой инерции $\tau' \approx 200$ лет. В свою очередь, на основе этих параметров и параметра $\tau_{\text{CO}_2} \approx 45$ лет можно оценить величину эффективной климатической чувствительности $\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2}$ из уравнения (18), которая будет соответствовать инструментально наблюдаемым величинам $\tilde{\sigma}_{\text{CO}_2} \approx 6.7^\circ \text{K}$ (4.5°K – для $2\times\text{CO}_2$).

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «ВОСТОК» И «КУПОЛ С»

Как уже указывалось, одним из базовых параметров климатической системы Земли является параметр суммарной климатической чувствительности σ , который входит в качестве коэффициента пропорциональности в уравнение зависимости изменения среднепланетарной температуры от концентрации диоксида углерода в атмосфере. Чем выше коэффициент суммарной климатической чувствительности σ , тем реальнее опасность развития процесса глобального потепления в связи с увеличением техногенных выбросов углекислого газа в атмосферу. В рамках различных теоретических подходов для парникового эффекта получена следующая зависимость изменения среднепланетарной температуры у поверхности Земли ΔT_0 как функция изменения концентрации CO_2 в атмосфере:

$$\Delta T(t) = \sigma \cdot \ln \left(\frac{\rho_{CO_2}^{pr} + \Delta \rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}^{pr}} \right), \quad (19)$$

где $\rho_{CO_2}^{pr} = 280 \text{ ppm}$ – доиндустриальная (базовая) концентрация CO_2 , $\Delta \rho_{CO_2} = \rho_{CO_2} - \rho_{CO_2}^{pr}$, где ρ_{CO_2} – текущая концентрация CO_2 , $\Delta T = T - T^{pr}$, где T^{pr} – доиндустриальная температура. В различных моделях зачастую приводятся различные теоретические значения величин климатической чувствительности Земли. Например, в работах [2, 3] (радиационно-адиабатическая модель) величина σ для 2-х компонентного парникового эффекта ($CO_2 + H_2O$) оценивается как $\sigma'_{CO_2} \approx 37^\circ \text{K}$ ($37\text{--}81^\circ \text{K}$), а в работах IPCC [1] (радиационно-конвективная модель) $\sigma = 2.2\text{--}6.5^\circ \text{K}$.

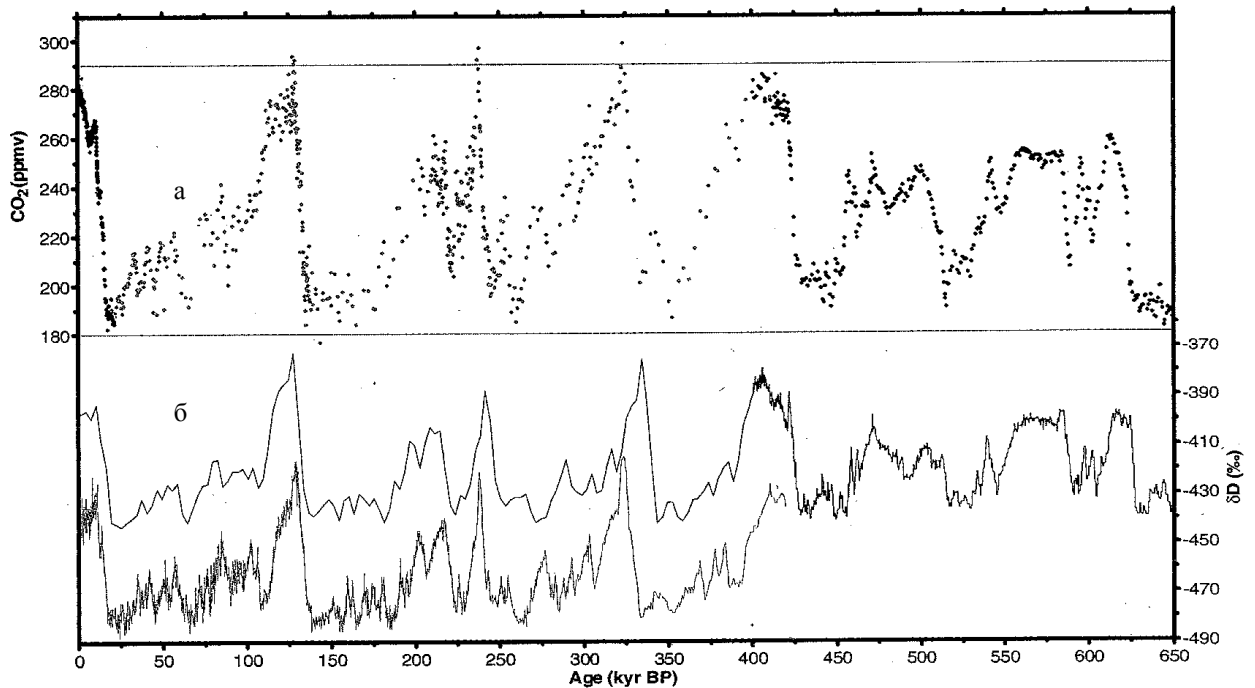


Рис. 1. Палеоклиматические данные: а – концентрация CO_2 , полученная путем комбинации данных со станции «Восток» (0–420 тыс. лет) [7, 8] и «Купола С» (390–650 тыс. лет) [9, 10]; б – содержание дейтерия в керне льда, полученном на станции «Купол С» (верхний график) и на станции «Восток» (нижний график).

Как было показано в предыдущем разделе, эти различия зачастую обусловлены различными определениями соответствующих величин в рамках различных моделей зависимости среднепланетарной температуры Земли от концентрации CO_2 . Так, если речь идет о стационарных моделях без учета положительной обратной связи «среднепланетарная температура» - «повышение концентрации паров воды в атмосфере» (2) или о моделях с эффективной величиной климатической чувствительности (17) использование диапазона $\sigma = 2.2\text{--}6.5^\circ \text{K}$ является оправданным. Но в том случае, когда рассматривается стационарная модель с учетом положительной обратной связи, обусловленной парами воды (11), следует использовать перенормированное значение климатической чувствительности $\sigma'_{CO_2} \approx 37^\circ \text{K}$ [2, 3]. Некоторая сложность для понимания здесь обусловлена тем, что совершенно разные с физической точки зрения частные случаи описываются похожими формулами (6, 11, 17), различие между которыми заключается только в значениях соответствующих констант климатической чувствительности.

В связи с вышеизложенным, представляется интересной возможность непосредственной проверки теоретических результатов с использованием палеоклиматических данных изменения температуры (концентрации дейтерия) и концентрации CO_2 за последние 650 тысяч лет и полученных независимо на антарктических станциях «Восток» [7, 8] и «Купол С» [9, 10] (рис. 1).

Нами получена линейная и квадратичная аппроксимации экспериментальной зависимости изменения концентрации дейтерия $\Delta D (\text{‰})$ от величины $l = \ln(\rho_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{CO}_2}^{\text{pr}})$ за период 0–650 тыс. лет. В частности, квадратичная аппроксимация имеет вид (рис. 2):

$$\Delta D = (181.5 \pm 56.8) \cdot l^2 + (182.1 \pm 24.3) \cdot l - (391.3 \pm 2.3) \quad (20)$$

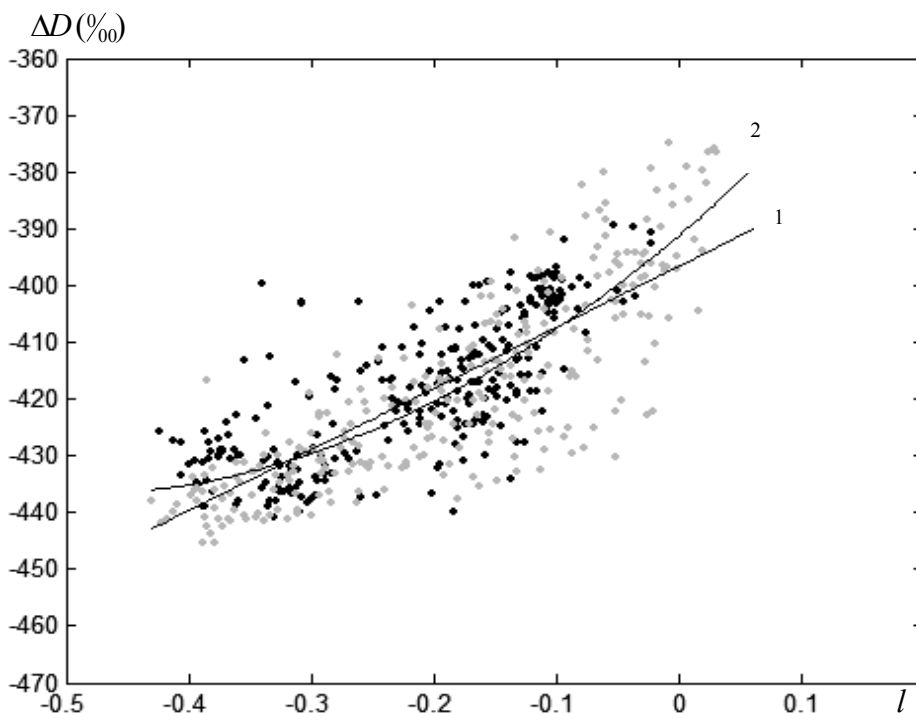


Рис. 2. Зависимость концентрации дейтерия от величины l . Точки – экспериментальные данные, линии – полиномиальные зависимости (1–линейная регрессия, 2 – квадратичная). Темные точки – «Купол С», светлые – «Восток».

Климатическая чувствительность Земли определяется исходя из соотношения: $\sigma(\rho_{\text{CO}_2}) = \Delta D / dl$. С учетом того, что эта величина обычно представляется в градусах Кельвина (Цельсия), а изменение концентрации дейтерия на 6‰ соответствует понижению температуры на 1⁰К [11], для квадратичной аппроксимации имеем:

$$\sigma = (60.5 \pm 18.9) \text{ }^0\text{K} \cdot l + (30.4 \pm 4.1) \text{ }^0\text{K} \quad (21)$$

Нами также была рассмотрена 4-х параметрическая аппроксимация вида:

$$\Delta D = c + d(l + \sqrt{(l-a)^2 + b^2}), \quad (22)$$

Преимуществом данной модели по сравнению с (21) является физически обоснованное асимптотическое поведение аппроксимируемой функции ΔD как при $l \rightarrow -\infty$, так и при $l \rightarrow \infty$.

На рисунке 3 приведены зависимости равновесной климатической чувствительности от концентрации диоксида углерода, полученные на основе регрессионных моделей (21) и (22). Также показана величина равновесной

климатической чувствительности, вычисленная в рамках радиационно-адиабатической теории 2-х компонентного ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) парникового эффекта [2] в приближении оптически плотной атмосферы $\sigma = 59^\circ \text{K} \pm 22^\circ \text{K}$.

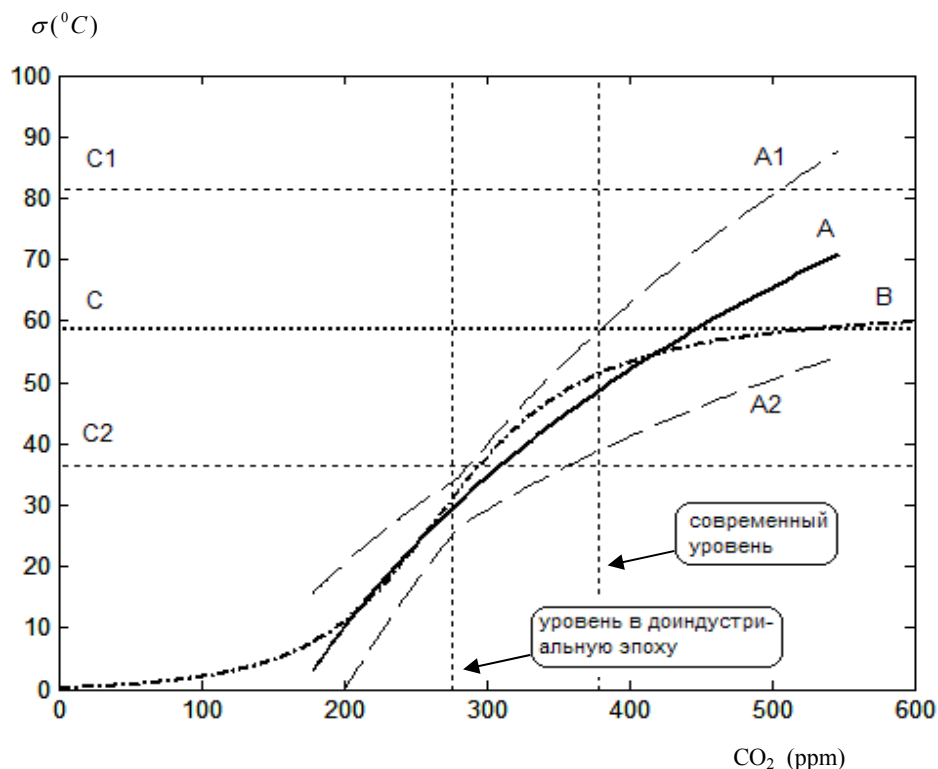


Рис. 3. Зависимость σ от концентрации CO_2 в атмосфере: А — квадратичная модель (А1, А2 — доверительные интервалы); В — 4-х параметрическая модель; С — базовая величина климатической чувствительности в соответствии с радиационно-адиабатической теорией; С1, С2 — доверительные интервалы.

Из рисунка 3 видно, что для высоких значений концентраций диоксида углерода $\rho_{\text{CO}_2} \geq 300 \text{ ppm}$ регрессионные модели находятся в хорошем соответствии с этой теоретической величиной климатической чувствительности, вычисленной с учетом сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура» — «концентрация паров воды в атмосфере», которая в рамках радиационно-адиабатической теории парникового эффекта [2] описывается аналитически.

При этом снижение климатической чувствительности при низких значениях CO_2 вплоть до величин, близких принятым ИРСС ($2\text{--}6^\circ \text{K}$), объясняется нарушением условия оптической плотности атмосферы и повышением вклада поверхности Земли в суммарное тепловое излучение, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента положительной обратной связи «среднепланетарная температура» — «концентрация паров воды в атмосфере».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящей статье анализ соотношения между различными типами констант климатической чувствительности в рамках соответствующих глобальных моделей позволил сформировать самосогласованный набор ключевых параметров, определяющих изменение среднепланетарной температуры в рамках процессов различных временных масштабов. Набор моделей с предложенными параметрами одинаково хорошо описывает как быстрые изменения среднепланетарной температуры,

вызванные антропогенным выбросом в атмосферу CO₂, так и сравнительно медленные ее вариации на протяжении последних 650 тысяч лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. *IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. P. 994.
2. Карнаухов А.В. Роль биосферы в формировании климата Земли. Парниковая катастрофа. *Биофизика*. 2001. Т. 46. № 6. С. 1138-1149.
3. Карнаухов А.В., Карнаухова Е.В. Применение теоретико-групповых методов при моделировании сложных систем. *Биофизика*. 2008. Т. 53. № 5. С. 849-855.
4. Хофферт М., Майкл П. Повышение концентрации углекислого газа и климат: неравновесная реакция. В: *Углекислый газ в атмосфере*. Под ред. Баха В., Крейна А., Берже А., Лонгетто А. Москва: Мир, 1987. 534 с.
5. *Физический энциклопедический словарь*. Под ред. Прохорова А.М. Москва: Научное издательство «Большая физическая энциклопедия», 1995. С 633. URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/2449 (дата обращения: 04.11.2011).
6. Карнаухов А.В. Причинно-следственное моделирование как общий метод описания и исследования явлений в сложных иерархически организованных системах. *Биофизика*. 2006. Т. 51. С. 373-381.
7. Котляков В.М. *Избранные сочинения в шести книгах. Книга 1. Гляциология Антарктиды*. Москва: Наука, 2000. 432 с.
8. Petit J.R. Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J. Delaygue G., Delmotte M. Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.M., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999. V. 399. P. 429-436.
9. Augustin L., Barbante C., Barnes P R F., Barnola J.M., Bigler M., Castellano E., Cattani O., Weiss J., Wilhelms F., Winther J.G., Wolff E.W., Zuchelli M. (EPICA community members). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*. 2004. V. 429. P. 623-628.
10. Siegenthaler U. Stocker T.F., Monnin E., Luthi D., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J.-M., Fischer H., Masson-Delmotte V., and Jouzel J. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the late Pleistocene. *Science*. 2005. V. 310. P. 1313-1317.
11. Jouzel J., Lorius C., Petit J.R. Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature*. 1987. V. 329. P. 403-409.

Материал поступил в редакцию 13.11.2011, опубликован 26.01.2012.