

¹ Институт биофизики СО РАН
Академгородок, 50, стр. 50, Красноярск, 660036, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН
Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036, Россия

³ Сибирский федеральный университет
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: pbel@icm.krasn.ru

МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «БИОСФЕРА–КЛИМАТ» И ЕЕ КОМПОНЕНТЫ *

В настоящее время экосистемы суши поглощают примерно четверть антропогенных выбросов CO₂ по причине того, что фотосинтез превышает дыхание почв. Но под воздействием глобального потепления этот сток может прекратиться и экосистемы суши станут источником CO₂ вследствие ускорения разложения почвенного органического вещества. Для исследования условий, при которых система «биосфера–климат» может перейти к самоподдерживающемуся разогреву, за счет положительной обратной связи «потепление – выделение CO₂ биосферой» была разработана минимальная модель системы «биосфера–климат».

Ключевые слова: принцип наихудшего сценария, минимальная модель биосферы и климата, необратимые биосферно-климатические изменения.

Введение

Наблюдающиеся тенденции глобальных изменений климата и биосферы все более остро ставят проблему прогноза динамики их состояния. Однако принципиально неустранимая неопределенность в оценке параметров биосферы и климатической системы приводит к тому, что любой полученный на математической модели сценарий является вероятностным. Причина заключается в том, что оценки почти всех параметров биосферы и климата имеют приближенный характер. Так, например, оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт; в биомассе – от 500 до 850 Гт; в почве – от 1080 до 2000 Гт, первичная продукция фотосинтеза варьирует в диапазоне 110–120 ГтС/год [1–4]. Наиболее вероятное значение одного из важнейших параметров системы «биосфера–климат» – чувствительности климата, равного повышению глобальной температуры при удвоении атмосферной концентрации CO₂ равно 4,5 °С [5], однако по некоторым оценкам этот параметр может достигать 11 °С [6]. Но не все возможные сценарии равнозначны по последствиям. Очевидно, что наибольшее внимание должны привлекать наиболее опасные варианты глобальной динамики. Таким образом, проблема состоит в выявлении наиболее неблагоприятных сценариев развития системы «биосфера–климат» и оценке условий и времени их реализации.

Большинство математических моделей климата демонстрируют плавную динамику изменений атмосферного CO₂ и приземных температур с увеличением общего количества углерода в атмосфере вследствие сжигания ископаемых топлив [5–7]. Однако постепенное глобальное изменение – это только возможный вариант будущего, и к тому же достаточно оптимистичный, поскольку в этом случае теоретически возможно ослабить негативные изменения путем уменьшения антропогенного воздействия и даже вернуться к начальному состоянию.

* Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН (№ 50-2009).

В настоящее время экосистемы суши поглощают примерно четверть антропогенных выбросов CO_2 по причине того, что фотосинтез превышает дыхание почв. Но под воздействием глобального потепления этот сток может прекратиться и экосистемы суши станут источником CO_2 вследствие ускорения разложения почвенного органического вещества. Для исследования условий, при которых система «биосфера–климат» может перейти к самоподдерживающемуся разогреву, за счет положительной обратной связи «потепление – выделение CO_2 биосферой» были разработаны минимальные модели биосферы и климата.

Минимальная модель биосферы с учетом вклада океана

Для целей данной работы обобщенная (включающая сушу и океан) минимальная модель биосферы подверглась упрощению по сравнению с вариантом, опубликованным ранее [8; 9]. Из рассмотрения был исключен блок океанической биоты, вкладом которой в развитие катастрофического биосферного режима, как показали модельные эксперименты, можно пренебречь.

Система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{dt} = S(y, T(A)) + C_{a_up} BM_{out}(A) - P(x, A, T(A)) - C_{a_down} AM_{in}(A) + fuel(t);$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x);$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A));$$

$$\frac{dB}{dt} = [C_{a_down} AM_{in}(A) + C_{d_up} U] - [C_{f_down} B + C_{a_up} BM_{out}(A)];$$

$$\frac{dU}{dt} = C_{f_down} B - C_{d_up} U.$$

Первое уравнение описывает изменения количества углерода в земной атмосфере, второе – изменения количества углерода в биомассе живых растений, третье – динамику органических остатков, четвертое – динамику углерода в фотическом слое океана, пятое – динамику углерода в глубинных слоях океана.

Подробное описание и предположения, принятые при построении модели, были изложены ранее [8; 9], поэтому здесь будут описаны только виды функций, использованных в уравнениях.

Функция скорости роста растительной биомассы (ГтС/год) имеет вид

$$P(x, A, T) = V_p \cdot x \cdot (x_{\max} - x) \cdot V(A) \cdot f_p(T(A)),$$

где x – количество углерода в биомассе растительного компартмента (ГтС); A – атмосферный углерод (ГтС); T – среднегодовая глобальная приповерхностная температура; V_p – масштабный фактор ($1/(\text{ГтС} \times \text{год})$); x_{\max} – предельное количество биомассы, зависящее от предельной допустимой плотности растительного покрытия (ГтС), задается в модели как $x_0 G$, где x_0 – количество наземной биомассы растений в настоящее время; G – коэффициент, характеризующий возможность растений увеличить количество биомассы.

Функция $V(A)$ описывает рост биомассы по отношению к атмосферной концентрации CO_2 в виде хорошо известной функции Моно:

$$V(A) = \frac{A}{K_A + A}.$$

Уравнение Моно обычно включает концентрации, но поскольку объем реакционного пространства (атмосфера) остается неизменной, модель использует общее количество атмосферного углерода как единицы, чтобы упростить подстройку данных. Параметр K_A выбран равным 900 ГтС на основе экспериментальных данных [10; 11].

Эмпирическая зависимость скорости роста растительной биомассы от температуры T и максимальной температуры T_{\max} имеет следующий вид:

$$f(T, T_{\max}) = T^d (T_{\max} - T), \text{ где } d = 1,5, \text{ и } 0 \leq T \leq T_{\max}. \quad (1)$$

Скорость отмирания биомассы (ГтС/год) записывается в простом виде:

$$D(x) = V_d \cdot x,$$

где V_d – масштабный фактор; x – количество углерода (Гт) в биомассе.

Скорость почвенного дыхания (разложение мертвой органики) и выделения CO_2 в атмосферу описывается следующей функцией:

$$S(y, T) = V_s \cdot y \cdot f_M(T),$$

где V_s – масштабный фактор; y – количество углерода в мертвой биомассе (Гт); $f_M(T)$ – функция типа (1), выражающая температурную зависимость почвенного дыхания, но при больших значениях максимальной температуры.

Слагаемое $C_{a_down}AM_{in}(A)$ описывает поглощение углекислого газа поверхностным слоем океана, а слагаемое $C_{a_up}BM_{out}(A)$ – эмиссию углекислого газа с поверхности океана в атмосферу. Переменные коэффициенты $M_{in}(A) = e^{-0.03[T(A)-T_0]}$ и $M_{out}(A) = e^{0.03[T(A)-T_0]}$ описывают физическое явление – падение растворимости газа в жидкости при повышении температуры. Эти коэффициенты получены путем простой эмпирической аппроксимации данных по концентрации CO_2 в воде при различной температуре [1]. Слагаемое $C_{d_up}U$ описывает апвеллинг, а $C_{f_down}B$ – даунвеллинг.

Минимальная модель климата

С целью построения минимальной модели климата проводился анализ описанных в литературе моделей климата. Был сделан вывод, что в климатической системе происходят сложные нелинейные процессы и в настоящее время не удастся достоверно выделить простые зависимости для описания этих процессов [12]. Наиболее полно климатическую динамику воспроизводят трехмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Из численных экспериментов с этими моделями можно выделить основные факторы, влияющие на среднегодовую глобальную приповерхностную температуру. На основе этих данных предлагается минимальную модель биосферы дополнить следующим уравнением для описания динамики температуры:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = \Delta R_f + \sum_i f_i \Delta T. \quad (2)$$

Здесь $C = 1,1 \pm 0,5$ [ГДж·м⁻²·°C⁻¹] (оценивается из наблюдений поглощения тепла океаном [13] и текущими трендами потепления [14]) – теплоемкость климатической системы, ΔT [°C] – изменение глобальной среднегодовой поверхностной температуры воздуха, вследствие радиационного воздействия ΔR_f [Вт·м⁻²] (может быть вычислено по формуле

$$\Delta R_f = 5,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \ln\left(\frac{C}{C_0}\right), \text{ где } C \text{ и } C_0 \text{ – концентрации углекислого газа в атмосфере).}$$

Воздействие ΔR_f порождает изменение температуры ΔT , которое в свою очередь изменяет влияющие на климат процессы. Каждое из этих изменений вызывает дополнительное воздействие $f_i \Delta T$, где f_i [Вт·м⁻²·°C⁻¹] – коэффициент, соответствующий воздействию при изменении температуры на 1°С. Разумеется, итоговое значение температуры зависит от коэффициентов f_i , отражающих величину обратных связей. Единственным инструментом для оценки обратных связей в данный момент являются трехмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана. С помощью них были получены следующие оценки обратных связей [5]:

Длинноволновое излучение в космос будет увеличиваться на 3,2 Вт·м⁻² при увеличении температуры на 1°С, т. е. $f_l = -3,2$ Вт·м⁻²·°C⁻¹.

Считается, что относительная влажность в атмосфере будет сохраняться. Это приведет к увеличению абсолютной влажности и в соответствии с парниковым эффектом водяного пара $f_{vw} = 1,8 \pm 0,18$ Вт·м⁻²·°C⁻¹.

Повышение температуры приведет к уменьшению снежного и ледового покрова и из-за уменьшения альбедо $f_A = 0,26 \pm 0,08 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{С}^{-1}$.

Оценка обратных эффектов, связанных с облачностью, дает $f_C = 0,69 \pm 0,38 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{С}^{-1}$.

Оценка эффектов, связанных с изменением вертикального градиента температуры, дает $f_I = -0,84 \pm 0,26 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{С}^{-1}$.

Оценим установившееся изменение климата (достигается, когда радиационное воздействие уравновешивается обратными связями):

$$\Delta T = -\frac{\Delta R_f}{\sum_i f_i}.$$

Посчитаем, используя радиационное воздействие от парниковых газов $\Delta R_f = 3,7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ [5], нижнюю и верхнюю оценку для ΔT :

$$\Delta T_{\min} = -\frac{\Delta R_f}{\sum_i f_i} = -\frac{4}{-3,2 + 1,62 + 0,18 + 0,31 - 1,10} = -\frac{4}{-2,19} = 1,83^\circ\text{С},$$

$$\Delta T_{\max} = -\frac{\Delta R_f}{\sum_i f_i} = -\frac{4}{-3,2 + 1,98 + 0,34 + 1,07 - 0,58} = -\frac{4}{-0,39} = 10,26^\circ\text{С}.$$

Максимальная оценка ΔT намного больше отличается от средней, чем минимальная, хотя неточности в оценке обратных эффектов везде симметричны. Это объясняется тем, что зависимость ΔT от $\sum_i f_i$ является гиперболической и при уменьшении модуля $\sum_i f_i$

(обусловлено увеличением доли положительных обратных связей) ΔT быстро возрастает.

Другим важным моментом является то, что оценка суммарного антропогенного радиационного воздействия тоже имеет большие неточности, в основном в связи с влиянием аэрозолей. Аэрозоли оказывают как нагревающее, так и охлаждающее воздействие. Еще 10 лет назад считалось, что их итоговое воздействие близко к нейтральному. Однако последние оценки [5] попадают в интервал от -1 до $-2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. В работе [15] оценивается, к чему это приводит. Предполагается, что охлаждающий эффект аэрозолей будет снижаться за счет внедрения более чистых технологий и более короткого по сравнению с парниковыми газами времени жизни в атмосфере. Отмечается, что большой охлаждающий эффект от аэрозолей приводит к большой чувствительности климата и к удвоению углекислого газа. Этот эффект также может быть учтен с помощью уравнения (2) посредством вариации ΔR_f .

Таким образом, значительный рост чувствительности климата при небольшом увеличении оценки величины обратных связей не позволяет рассматривать только центральные оценки. В соответствии с принципом наихудшего сценария очень важно отследить, к каким последствиям могут привести положительные обратные связи. Поэтому минимальная биосферная модель была дополнена уравнением (2). Это уравнение можно рассматривать, как минимальную модель климата, для оценки обратных связей используются наиболее полные трехмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана.

Результаты моделирования

Использование минимальных моделей позволяет построить объединенную минимальную модель системы «биосфера–климат», позволяющую описывать влияние этих двух систем друг на друга. Это касается в первую очередь выявления положительных обратных связей, представляющих наибольшую опасность с точки зрения сохранения устойчивости объединенной системы. С помощью объединенной минимальной модели «биосфера–климат» выявлялись катастрофические сценарии и условия их возникновения, которые могут быть использованы для грубого «наведения», «прицеливания» более сложных и детальных моделей биосферы и климата.

Возможные сценарии изменения биомассы наземных экосистем в зависимости от оценок обратной связи температуры и облачности приведены на рис. 1, в зависимости от радиационного воздействия аэрозолей – на рис. 2. Как видно, даже оценки вклада отдельных процессов при средних значениях прочих параметров приводят к возникновению или отсутствию катастрофической динамики. Также следует обратить внимание на то, что в течение как минимум 50 лет различия между разными сценариями являются практически незаметными.

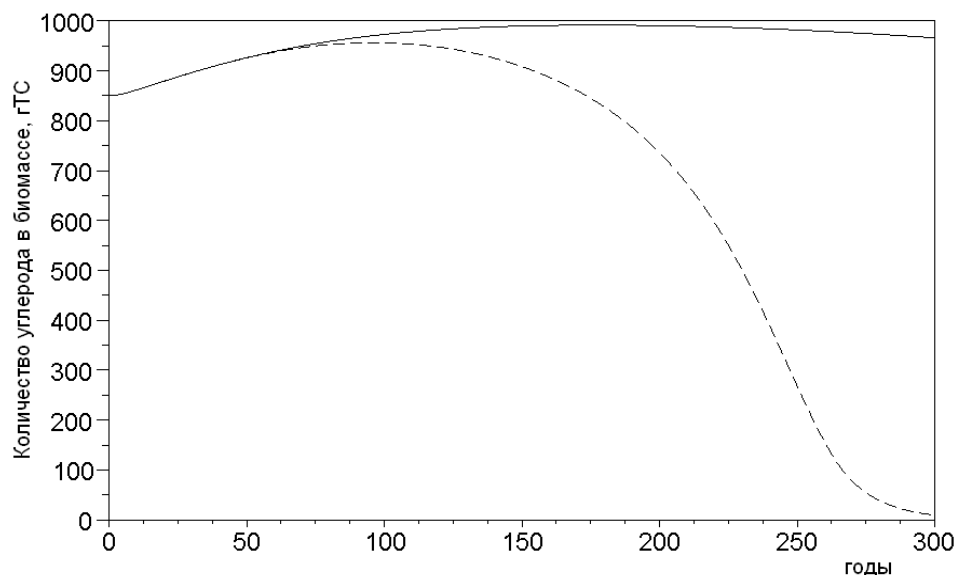


Рис. 1. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада эффектов облачности (параметр обратной связи $-f_C$). Сплошная линия соответствует минимальному значению f_C из отчета IPCC, а пунктирная – максимальному. Остальные параметры обратных связей имеют средние значения

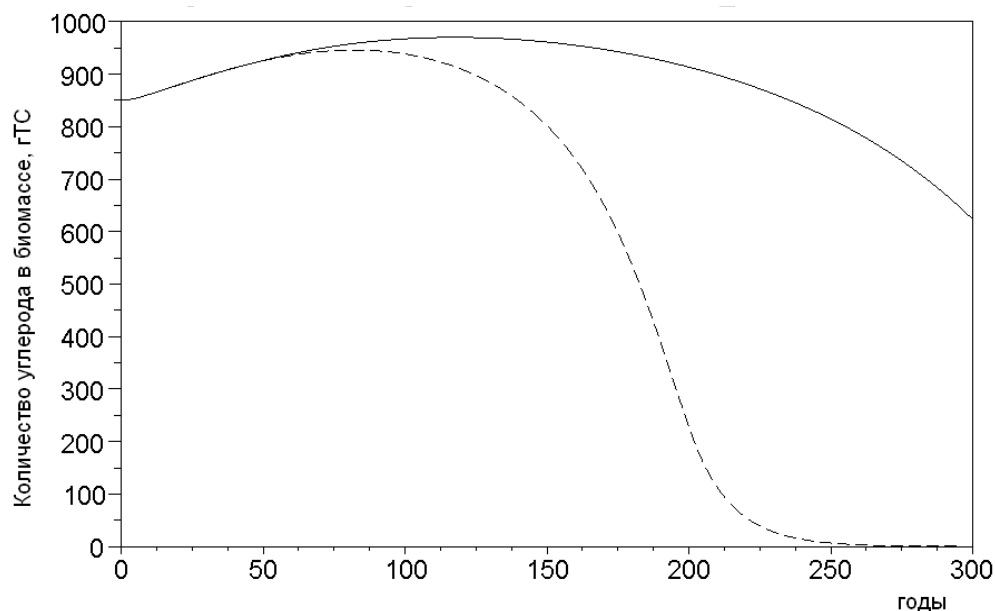


Рис. 2. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании радиационного воздействия аэрозолей (влияет на параметр R_C). Сплошная линия соответствует минимальной оценке влияния аэрозолей из отчета IPCC, а пунктирная – максимальной. Параметры обратных связей имеют средние значения

В результате показано, что явный учет климатических обратных связей и тепловой инерции земной поверхности не изменил полученного ранее основного результата минимальной биосферной модели о возможности возникновения необратимых катастрофических режимов.

Обсуждение

Как показывают многочисленные исследования, человек уже оказывает значительное влияние на биосферно-климатическую систему [5]. Поэтому многие научные центры заняты построением прогнозов состояния климата и биосферы. Например, в работах [16; 17] показана возможность развития положительной обратной связи между потеплением климата и биосферой (потепление – выделение наземными экосистемами CO_2 в атмосферу – усиление парникового эффекта). Рассматриваемая положительная обратная связь объясняется в первую очередь тремя механизмами: ускорением разложения почвенной органики при потеплении климата, снижением глобальной чистой первичной продукции (ЧПП) фотосинтеза при значительном и быстром потеплении климата и чувствительностью климата к повышению концентрации углекислого газа в атмосфере. В настоящее время эти механизмы заложены в большинство моделей углеродного цикла. Правда, количественные оценки этих эффектов значительно расходятся. Тем не менее в большинстве климатических моделей, которые включают динамику углеродного цикла, общий эффект взаимодействия углеродного цикла и климата является положительной обратной связью [5]. Другое дело, что величина этой обратной связи бывает разной: в одних моделях она почти незаметна, в других приводит к катастрофическим процессам. Сопряжение минимальных моделей биосферы и климата дает в руки исследователей инструмент для «наглядного» изучения динамических режимов в объединенной системе «биосфера–климат» с возможностью последовательного и выверенного уточнения этой модели.

Список литературы

1. Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
2. Семёнов С. М. Парниковые газы и современный климат земли. М.: ИЦ «Метеорология и гидрология», 2004. 176 с.
3. IPCC, Climate Change 2001: Scientific aspects, UNEP, 2001. 881 p. URL: www.ipcc.ch.
4. Brovkin V., Sitch S., Bloh von W., Claussen M., Bauer E., and Cramer W. Role of land cover changes for atmospheric CO_2 increase and climate change during the last 150 years // *Glob. Change Biol.* 2004. Vol. 10. P. 1253–1266.
5. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.
6. Stainforth D. A., Aina T., Christensen C., Collins M., Faull N., Frame D. J., Kettleborough J. A., Knight S., Martin A., Murphy J. M., Piani C., Sexton D. L., Smith A. R., Spicer A. A., Thorpe J., Allen M. R. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases // *Nature*. 2005. Vol. 433. P. 403–406.
7. Тарко А. А. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2005. 232 с.
8. Барцев С. И., Дегерменджи А. Г., Ерохин Д. В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // *ДАН*. 2005. Т. 401, № 2. С. 233–237.
9. Bartsev S. I., Degermendzhi A. G., Erokhin D. V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // *Ecological modeling*. 2008. P. 160–171.
10. Pritchard S. G., Davis M. A., Mitchell R. J., Prior A. S., Boykin D. L., Rogers H. H., Runion G. B. Root dynamics in an artificially constructed regenerating longleaf pine ecosystem are affected by atmospheric CO_2 enrichment // *Environmental and Experimental Botany*. 2001. Vol. 46. P. 35–69.
11. Morgan J. A., LeCain D. R., Mosier A. R., Milchunas D. G. Elevated CO_2 enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C3 and C4 grasses of the Colorado shortgrass steppe // *Global Change Biol.* 2001. Vol. 7. P. 451–466.
12. Монин А. С., Шишков Ю. А. Климат как проблема физики // *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.

13. *Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P. & Stephens C.* Warming of the world ocean // *Science*. 2000. Vol. 287. P. 2225–2229.
14. *Folland C. K. et al.* Global temperature change and its uncertainties since 1861 // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. P. 2621–2624.
15. *Andreae M. O., Jones C. D., Cox P. M.* Strong present-day aerosol cooling implies a hot future // *Nature*. 2005. Vol. 435. P. 1187–1190.
16. *Cox P. M., Betts R. A., Jones C. D., Spall S. A., Totterdell I. J.* Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model // *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 184–187.
17. *Lenton T. M.* Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model // *Tellus*. 2000. Vol. 52B. P. 1159–1188.

Материал поступил в редколлегию 10.02.2011

S. I. Bartsev, P. V. Belolipetsky, A. G. Degermendzhi

MINIMAL MODEL OF «BIOSPHERE–CLIMATE» SYSTEM

Currently the land is absorbing about a quarter of anthropogenic CO₂ emissions, because uptake by plant photosynthesis is outstripping the respiration from soils. But due to global warming this sink may reverse and continental ecosystems became the source of CO₂ due to accelerated decomposition of soil organic matter. Minimal model of biosphere–climate system was developed for investigation conditions for avalanche-like changes, caused by amplification of the positive feedback: «anthropogenic emission of CO₂ – temperature increase – additional CO₂ emission due to decomposition of soil organics».

Keywords: the worst scenario principle, minimal model of biosphere and climate, irreversible biosphere–climate changes.