

Качественный и численный анализ минимальной модели углеродного цикла

С.И. БАРЦЕВ

Институт биофизики СО РАН

С.Б. МЕДВЕДЕВ, А.И. ПЕСТУНОВ, И.А. ПЕСТУНОВ, А.М. ФЕДОТОВ

Институт вычислительных технологий СО РАН

e-mail: apestuov@gmail.com; fedotov@ict.nsc.ru

Исследуется глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере при условии, что антропогенные выбросы углерода в атмосферу отсутствуют. Показана неустойчивость начального стационарного состояния, приведены параметрические портреты модели.

В последние десятилетия проблема глобального круговорота углерода привлекает особое внимание [1,2]. Интерес к этой проблеме вызван существующей гипотезой о парниковом эффекте – наличием связи между температурой атмосферы и содержанием в ней "парниковых" газов (диоксид углерода, метан, пары воды, окислы азоты, фреоны и др.), которая обусловлена различием в проводимости этими газами коротковолнового и длинноволнового излучения. Считается [3], что среди парниковых газов диоксид углерода оказывает наиболее существенное влияние на климат. Анализ литературы показывает, что в настоящее время среди ученых нет единого мнения относительно наличия или отсутствия парникового эффекта. Тем не менее, если предположить, что эта гипотеза верна, то наблюдаемое с 1958 года возрастание процентного содержания диоксида углерода в атмосфере [4] способствует возникновению риска увеличения глобальной температуры и связанных с этим катастрофических явлений глобального масштаба [5]. Являются ли уровни CO_2 беспрецедентно высокими – предмет дискуссии [6-9], да и сам рост температуры последние полвека может быть вызван иными закономерностями или стохастическими факторами [10,11]. Кроме того, рост концентрации CO_2 может быть следствием изменения температуры, учитывая, что океан является резервуаром

этого газа и выделяет его при нагреве [12]. Так или иначе, крайняя важность вопроса и принцип предосторожности [3] позволяют включать предположение о глобальном потеплении в математические модели [13-16].

С помощью минимальных моделей нельзя, конечно, описать наиболее вероятную динамику развития биосферы, соответствующую совокупному действию множества известных климатических и биосферных процессов. Однако исследование таких моделей позволяет понять качественные механизмы основных процессов, происходящих в биосфере. Рассматриваемая модель записывается в виде системы из трёх уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_x \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_{MaxGrowth}(T(A)) - V_d \cdot x, \\ \frac{dy}{dt} = V_d \cdot x - V_s \cdot y \cdot f_{MaxDecay}(T(A)), \\ A = C - x - y. \end{cases}$$

Первое уравнение системы описывает динамику углерода в биомассе растений, второе – динамику углерода органических остатков, третье – закон сохранения массы углерода.

Здесь $f_{MaxGrowth}(T) = T^d \cdot (T_{MaxGrowth} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxGrowth} - T)$ – зависимость прироста биомассы растений от среднегодовой глобальной температуры, где Θ – ступенчатая функция равная 1 при положительных значения аргумента и 0 в остальных случаях;

$f_{MaxDecay}(T) = T^d \cdot (T_{MaxDecay} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxDecay} - T)$ – зависимость почвенного дыхания от температуры;

$T(A) = T_0 + T_{del} \cdot \log_2 \frac{A}{A_0}$ – зависимость глобальной температуры от углерода атмосферы;

$V(A) = \frac{A}{K_0 + A}$ – зависимость вида Моно для прироста биомассы от углерода атмосферы.

Сведения о параметрах представлены в таблице. Масштабируемые множители V_x , V_d , V_s выбирались таким образом [13], чтобы обеспечить стационарные (без антропогенной эмиссии углерода в атмосферу) скорости прироста ЧПП (чистой первичной продукции), отмирания биомассы и почвенного дыхания равные $P_0 = 55$ Гт в год, соответствующие оценке 1958 года, т.е. определяются из условий:

$$V_x \cdot x_0 \cdot (x_{max} - x_0) \cdot V(A_0) \cdot f_{MaxGrowth}(T(A_0)) = V_d \cdot x_0 = V_s \cdot y_0 \cdot f_{MaxDecay}(T(A_0)) = P_0.$$

Таблица. Параметры системы

Параметр	Мин. возможное значение	Макс. возможное значение	Описание
A_0	600	760	Количество углерода в атмосфере в 1958 г., Гт
x_0	500	850	Количество углерода в биомассе в 1958 г., Гт
y_0	1080	2011	Количество углерода гумуса в 1958 г., Гт
x_{max}	891	1296	Максимально возможное количество углерода в биомассе, Гт
d	1.5	1.5	Степень
$T_{MaxGrowth}$	30	45	Максимальная температура, при которой происходит рост биомассы, $t^\circ C$
$T_{MaxDecay}$	30	45	Максимальная температура распада органики, $t^\circ C$
T_0	15	15	Глобальная среднегодовая температура поверхности в настоящее время, $t^\circ C$
T_{del}	2	6	Прирост температуры при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере $t^\circ C$
K_0	900	930	Определяется экспериментально
P_0	50	60	Стационарные скорости прироста ЧПП, отмирания биомассы и интенсивности почвенного дыхания в 1958 г., Гт/год
V_x, V_d, V_s	вычисляются из условия равенства потоков		Масштабируемые множители

Несмотря на отсутствие антропогенных выбросов углерода в атмосферу предположение о парниковом эффекте сохранено, только речь здесь идёт уже о "естественном" парниковом эффекте. Старт системы в 1958 году обусловлен началом измерений концентрации углекислого газа в атмосфере на станции Мауна-Лоа (Гавайи).

При определённых параметрах, попадающих в диапазоны своих оценок начальное состояние биосферы является неустойчивым по Ляпунову. Отметим, что важной особенностью рассматриваемой минимальной модели является то, что она основана только на

балансовых отношениях динамики углерода, то есть найденная неустойчивость является следствием только законов сохранения и не связана с деятельностью человека. В докладе приводятся параметрические портреты модели при типичных значениях параметров. Обсуждаются свойства главных изоклин, линий моностационарности и нейтральности. В неустойчивой особой точке типа "седло" происходит триггерный переход в другие стационарные состояния, существенно различающиеся по своим биосферным показателям, включая глобальную температуру.

Список литературы

- [1] КОНДРАТЬЕВ К.Я., КРАПИВИН В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. - М.: Физматлит, 2004. 336 с.
- [2] United States Carbon Cycle Science Program
<http://www.carboncyclescience.gov/links.php>
- [3] ТАРКО А.М. Можем ли мы затормозить глобальное потепление? Россия в окружающем мире - 2008. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: Аналитический ежегодник / Отв. ред. Н.Н. Марфенин; под общей редакцией Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. - М.: Изд-во МНЭПУ. 2008. 328 с.
- [4] <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html> - данные измерительных станций углекислого газа.
- [5] IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Fourth Assessment report, Intergovernmental Panel on Climatic Change, Geneva, Switzerland, 2007.
- [6] PETIT J.R., JOUZEL J., BARKOV N.I., KOTLYAKOV V.M. et al. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature, 3 June 1999. Vol. 399. P. 429-436.
- [7] SIEGENTHALER URS et al. Stable carbon cycle-climate relationship during the late pleistocene // Science, 25 November 2005. Vol. 310. P. 1313-1317.
- [8] BECK ERNST-GEORG. 180 years of atmospheric CO₂ gas analysis by chemical methods // Energy and Environment. 2007. Vol. 18(2). P. 259-282.
- [9] JAWOROWSKI Z., SEGALSTAD T.V. AND ONO N. Do glaciers tell a true atmospheric CO₂ story? // Science of the Total Environment. 1992. Vol. 114. P. 227-284.

- [10] Крученицкий Г.М. Глобальная температура: потенциальная точность измерения, стохастические возмущения и долговременные изменения // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20(12). С. 1064-1070.
- [11] Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). - М.: Научный мир. 2000. 304 с.
- [12] Абдусаматов Х.И. Солнце определяет климат // Наука и жизнь. 2009. №1. С. 40.
- [13] Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // ДАН, Геофизика. 2005. Т. 401(2). С. 233-237.
- [14] Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. 2005. М.: ФИЗМАТЛИТ. С. 57.
- [15] Дубровина Е.С., Моничев А.Я. Модельный анализ динамических особенностей развития парникового эффекта // Вестник Нижегородского ГУ им. Н.И.Лобачевского. 2008. №4. С. 97-101.
- [16] Борисенков Е.П., Пичугин Ю.А. Возможные негативные сценарии динамики биосферы как результат антропогенной деятельности // ДАН, География. 2001. Т. 378(6). С. 812-814.