

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА И АЗОТА В СИСТЕМЕ «АТМОСФЕРА — РАСТЕНИЯ — ПОЧВА»\*

А.И. Курбатова<sup>1</sup>, А.М. Тарко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Экологический факультет  
Российский университет дружбы народов  
Подольское ш., 8/5, Москва, Россия, 113093

<sup>2</sup>Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН  
ул. Вавилова, 40, Москва, Россия, 119333

Проведено моделирование глобального биогеохимического цикла углерода и азота на фоне глобального потепления и других антропогенных воздействий на биосферу. Результаты моделирования выявили несостоятельность теории порогового кризиса биосферы.

**Ключевые слова:** антропогенное воздействие, глобальный цикл углерода, биосферные параметры.

## Описание модели

Разработана математическая модель, которая учитывает биогеохимические циклы углерода и азота в системе «атмосфера — растения — почва» (АРП). Цикл углерода определяет парниковый эффект двуокиси углерода от антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу при сжигании ископаемых органических топлив (каменного угля, нефти, газа), а цикл азота отражает роль азотного питания растений в биосферной динамике.

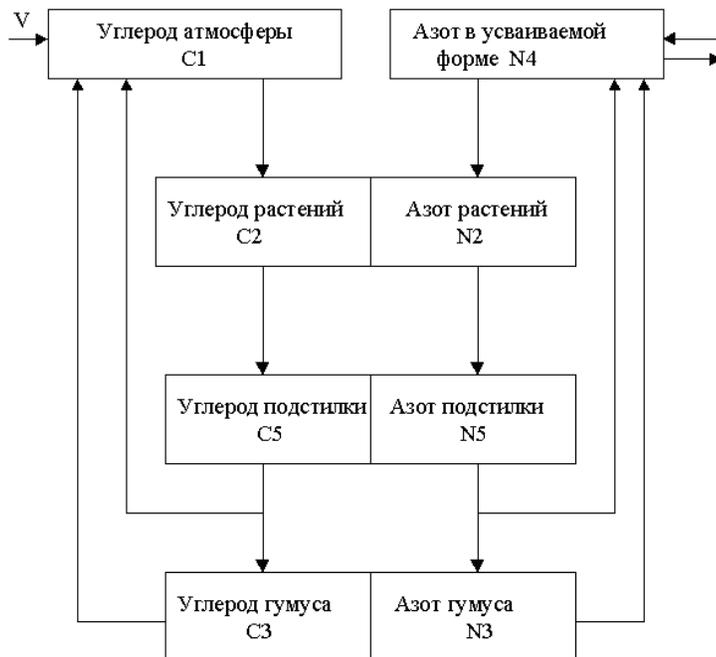
Фазовыми переменными модели являются углерод двуокиси углерода атмосферы, углерод и азот растительности суши, углерод и азот подстилки, углерод и азот гумуса, а также азот почвы в усвояемой растениями форме. Параметром модели является средняя глобальная температура атмосферы. Схема круговорота углерода и азота, принятая в модели, представлена на рис. 1. Потоки углерода и азота переходят из уровня в уровень, например, в процессе фотосинтеза углерод из углерода атмосферы переходит в углерод растений, а азот в усваиваемой форме переходит в азот растений.

Учтем, что азот почвы в усвояемой для растений форме расходуется на построение биомассы растений, а оставшаяся часть в течение одного года выносятся из системы. Поскольку время пребывания азота в усвояемой форме менее 1 года, а его масса намного меньше, чем у интересующих нас растений и гумуса, количество азота в усвояемой форме можно не рассчитывать.

С достаточной точностью можно считать, что отношение количества углерода к количеству азота в растениях сохраняется постоянным. Тогда отношение годичной продукции, выраженной в углероде, к годичной продукции, выраженной в азоте, постоянно.

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-01-00575).



**Рис. 1.** Схема круговорота углерода и азота в модели глобальной системы «атмосфера — растения — почва»

Рассмотрим зависимости для потоков. В модели чистая первичная продукция и потребление углерода зависят от концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (парниковый эффект), количества азота в усваиваемой форме в почве и температуры атмосферы. Коэффициент  $\gamma$  выражает зависимость годичной продукции от количества азота в усваиваемой форме: если значение  $\gamma$  близко к нулю, то эта зависимость мала; если  $\gamma = 1$ , то зависимость максимальна. Считаем, что интенсивность отмирания растений пропорциональна их биомассе.

Полагаем, что разложение углерода и азота подстилки происходит независимо с разными удельными скоростями и отношение потоков углерода, переходящих в результате разложения подстилки в атмосферу и гумус, постоянно и постоянно отношение потоков азота, переходящих из подстилки в гумус и усваиваемую форму. Будем считать, что разложение углерода и азота подстилки при повышении температуры подчиняется закону Вант-Гоффа.

Единица времени в модели — 1 год. За начальное состояние модели возьмем состояние в начале так называемого антропогенного периода, когда выбросы  $\text{CO}_2$  от сжигания индустриальных топлив (каменный уголь, нефть, газ) в глобальном плане стали достаточно велики. За его начало примем 1860 г. Считаем, что в доантропогенный период глобальные потоки углерода в системе были сбалансированы и количество углерода в системе АРП постоянно.

Данные, характеризующие круговорот углерода и азота, взяты из [2; 7—10; 12; 13]. Начальные значения переменных и коэффициенты были выбраны следующие:

- |                        |              |
|------------------------|--------------|
| углерод атмосферы      | — 600 Гт С,  |
| углерод растительности | — 1000 Гт С, |

углерод гумуса	— 1200 Гт С,
углерод подстилки	— 120 Гт С,
годовая продукция растительности	— 60 Гт С/год.

Отношение количества углерода к количеству азота в древесине растений — 40, в гумусе — 10, в подстилке — 25.

### Результаты моделирования. Роль азотного питания растений и значение подстилки в динамике биосферы

Изучались динамические свойства модели под влиянием промышленных выбросов в период 1860—2060 гг. Рассмотрим сценарий, в котором происходили промышленные выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу в 1860—2000 гг., их значения брались из [11]. После 2000 г. рост выбросов полагался равным 1,44% в год. Проводилось несколько компьютерных расчетов с различными значениями коэффициента  $\gamma$ , выражающего зависимость годичной продукции от количества азота в усвояемой форме.

Увеличение количества двуокиси углерода благодаря парниковому эффекту сопровождается повышением температуры атмосферы. Оба фактора приводят к росту годичной продукции растений, а повышение температуры ведет к увеличению скорости разложения гумуса и подстилки. В результате часть  $\text{CO}_2$  из атмосферы поглощается растениями, подстилкой и гумусом (поглощение — при образовании продукции, при разложении — выделение). На рис. 2 представлены расчеты роста количества гумуса в данном сценарии для трех вариантов значения коэффициента  $\gamma$ . Видно, что количество гумуса растет приблизительно экспоненциально, причем чем больше  $\gamma$ , т.е. чем сильнее зависимость годичной продукции от усвояемого азота, тем быстрее растет гумус. Рост гумуса за рассмотренный период составляет 1,57—1,87%.

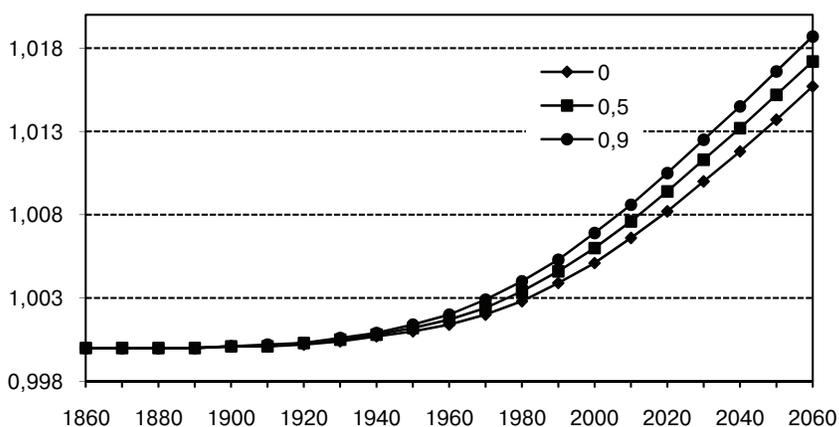


Рис. 2. Динамика относительного изменения гумуса при выбросах  $\text{CO}_2$  в атмосферу в 1860—2060 гг. при разных значениях  $\gamma$  ( $\gamma = 0$ ;  $\gamma = 0,5$ ;  $\gamma = 0,9$ )

Расчеты роста количества подстилки для трех вариантов значения коэффициента  $\gamma$  показывают, что как и в случае гумуса чем больше  $\gamma$ , тем быстрее растет подстилка. Рост подстилки за рассмотренный период составляет 8,9—9,7%.

Расчеты количества поглощенного растениями, подстилкой и гумусом количества углерода в 1860—2000 гг. показаны в табл. 1. Растения к этому году поглощают 101,3—115,2 Гт С, в подстилке накапливается 11,9—14,4 Гт С, а в гумусе — 7,2—9,6 Гт С. Поглощение атмосферных выбросов CO<sub>2</sub> экосистемами суши существенно, оно составляет около половины всех выбросов. При этом больше всего CO<sub>2</sub> поглощается растениями, затем идут подстилка и гумус.

Таблица 1

**Поглощение выбросов двуокиси углерода в экосистемах суши в 1860—2000 гг. (Гт С)**

Растения	Подстилка	Гумус
103,1	11,9	7,2
109,4	13,2	8,4
115,2	14,4	9,6

Рассмотрим соотношение поглощенных количеств CO<sub>2</sub> разными резервуарами биосферы. Оказалось, что соотношение поглощения выбросов не соответствует исходной массе соответствующих резервуаров. Исходное количество углерода в растительности и гумусе примерно одинаково, а подстилка содержит около 10% от их массы. Однако растения поглощают наибольшее количество углерода — 64,4—82,8% всего поглощенного CO<sub>2</sub>, гумус поглощает наименьшее количество (6—7%), а подстилка по поглощению стоит между ними (9,7—10,4%). Таким образом, почва в целом поглощает заметную долю выбросов двуокиси углерода, следовательно, она имеет важное глобальное значение в поглощении. Отметим важную роль подстилки в поглощении выбросов. Имея массу в 10 раз меньшую, чем гумус, она поглощает больше углерода, чем гумус.

Рассмотрим, в какой степени учет азотного питания растений является важным при анализе антропогенной деятельности. Согласно расчетам усвояемый азот увеличивается в период 1860—2060 гг., уход азота в растения также увеличивается, а его выход из системы АПР уменьшается. Это значит, что в процессе поглощения выбросов CO<sub>2</sub> цикл азота интенсифицируется, степень его разомкнутости уменьшается, все это способствует более сильному поглощению атмосферной двуокиси углерода. Приведенные расчеты показывают, что чем больше зависимость продуктивности от азотного питания, тем больше степень поглощения углерода и тем самым больше степень компенсации исследуемого воздействия. Рассмотрим два варианта: 1) нет учета азотного питания ( $\gamma = 0$ ); 2) азотное питание влияет на продуктивность максимально ( $\gamma = 0,9$ ). В этих случаях увеличение массы растительности, подстилки и гумуса будет различаться соответственно на 11,7 и 20,8 и 34%. Рост концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, например, к 2000 г. составит соответственно 25,5 и 22,7%. Два последних числа мало различаются, поэтому, несмотря на важность роли азотного питания, в расчетах последствий выбросов двуокиси углерода учет роли азотного цикла не обязателен.

### **Критика теории порогового кризиса биосферы**

В конце 1980-х гг. В.Г. Горшков сделал вывод о том, что на больших отрезках времени степень замкнутости круговорота веществ в биосфере, понимаемая как

отношение потоков выноса органических веществ из биосферы к величине биологической продукции, равна  $10^{-4}$  [5]. Он предположил, что биосфера регулирует биотические потоки и до начала антропогенной эпохи на больших отрезках времени устанавливалась величина указанной замкнутости. Впоследствии им было сделано заключение, что, поскольку в современных условиях деятельность человека привела к нарушению этой величины, биосфера будет деградировать [6]. Идея о деградации потом была воспроизведена его последователями [1], и был сделан вывод о необходимости ограничения потребления ресурсов биосферы и даже сокращения в 10 раз населения Земли. Говорилось, что поскольку критический порог (квота) потребления человеком чистой первичной продукции биоты превышен человеком в 10 раз, то устойчивость биосферы в настоящее время утрачена.

Идея об указанном виде деградации биосферы была отвергнута разными учеными [3; 4]. Здесь мы объясним несостоятельность идеи и приведем расчет на модели циклов углерода и азота.

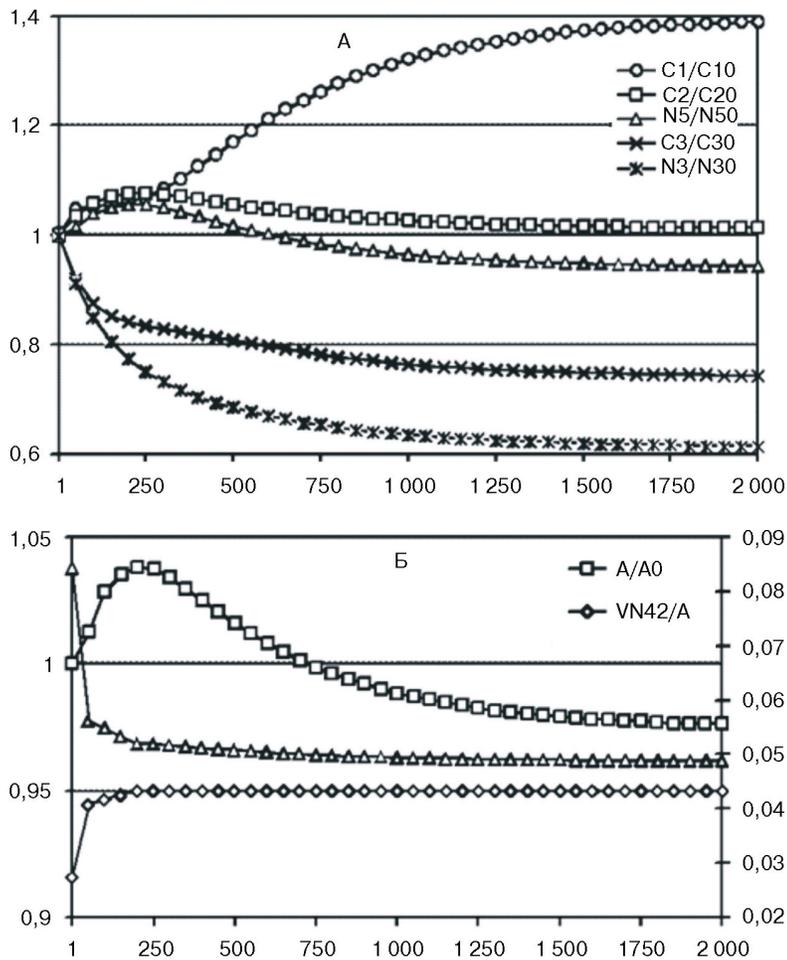
Действительно, поскольку циклы углерода, азота и других элементов в биосфере незамкнуты, всегда имеется некоторая степень замкнутости (и соответственно, разомкнутости) круговорота. Не будем спорить по поводу самой величины замкнутости круговорота. Автор идеи утверждает, что при антропогенных воздействиях превышение именно ему известной величины приведет к катастрофе. Данная идея, по мнению авторов, и является неверной. В действительности адаптационные свойства растений и в целом системы «растение — почва» таковы, что величина естественной замкнутости может быть многократно превышена по сравнению с данными палеорекоkonструкций.

Рассмотрим пример циклов углерода и азота, модель которых изложена в данной статье. Цикл азота незамкнут, часть азота в усвояемой форме постоянно уходит из системы, и равное количество (в невозмущенном состоянии) приходит. Мы видели, что в случае выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу цикл азота интенсифицируется: растение потребляет все большую долю усвояемого азота на построение своей биомассы, а само количество усвояемого азота увеличивается. Это означает, степень замкнутости круговорота возрастает, а количество активного вещества в нем увеличивается.

Анализ показывает, что автор идеи о данном виде деградации биосферы в своих оценках использует линейную модель с постоянными коэффициентами. Если в результате антропогенного воздействия начинается вынос вещества из системы (например, в результате эрозии почвы при неправильном землепользовании), то уменьшается количество азота в гумусе и подстилке, уменьшается азот в усвояемой форме. Утверждение В.Г. Горшкова означает в этом случае, что если вынос азота станет превышать величину выноса, полученную в палеорекоkonструкциях, то система перейдет в состояние с нулевой биомассой и продукцией. Это соответствует динамике, описываемой только линейной моделью.

Разработанная здесь модель нелинейная, она более гибко, чем линейная, описывает процессы в природе. В соответствии с этой моделью степень замкнутости круговорота возрастает при воздействиях.

Проиллюстрируем последствия антропогенных воздействий на примере эрозии почвы при неправильном землепользовании. Пусть каждый год из гумуса и подстилки почвы выносятся часть, равная 0,002. Это означает, что в год выносятся примерно 2 Гт С углерода и 0,2 Гт N азота, что составляет 4% от величины первичной продукции. Величина воздействия явно превышает установленную для биосферы критическую величину  $10^{-4}$ . При моделировании предполагалось, что вынесенный из почвы и подстилки углерод вследствие разложения органического вещества попадает в атмосферу в виде  $\text{CO}_2$ , а азот полностью выносится из системы. Результаты расчетов на 2000 лет представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Динамика относительных значений переменных модели для сценария эрозии почв:

А — количество  $\text{CO}_2$  в атмосфере (C1/C10), углерода фитомассы (C2/C20), азота подстилки (N5/N50), углерода гумуса (C3/C30), азота гумуса (N3/N30), углерода подстилки (C5/C50).

Б — усвояемый азот (A/A0) (левая ось), доля усвояемого азота, идущего в растения (VN42/A) (левая ось), выход усвояемого азота из системы (A-VN42)/A0 (правая ось).

По горизонтальной оси указаны годы от начала эксперимента

В соответствии с расчетами в результате воздействия система в течение 2000 лет приходит в новое, отнюдь не нулевое положение равновесия. Воздей-

стве в значительной степени компенсируется, как и предполагалось, количество гумуса уменьшается, причем в большей степени снижается азот (до 0,61 от начального значения), чем углерод (до значения 0,74). Фитомасса и подстилка сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Двуокись углерода в атмосфере растет до значения на 1,4. Главными результатами является увеличение количества забираемого растениями азота на 3,7% к концу рассматриваемого периода и уменьшение доли выхода усвояемого азота из системы на 42% по сравнению с исходным. Также важно, что количество усвояемого азота к концу рассматриваемого периода уменьшается незначительно, до величины 0,97 от исходной величины. Отметим важное значение парникового эффекта углекислого газа, благодаря которому происходит увеличение продуктивности растений.

Итак, мы видим, что при эрозии почвы степень замкнутости круговорота возрастает, а количество используемого азота увеличивается. В результате система выдерживает достаточно сильное воздействие, превышающее критическое воздействие, предусмотренное теорией В.Г. Горшкова.

Безусловно, возможно еще более сильное воздействие, при котором биосфера придет в упадок, но его величина должна быть существенно больше той, которую дают данные, полученные на основе палеорекострукции. Важно, что мы показали, что резервы ресурсов биосферы намного превышают те, которые были задействованы до антропогенного периода.

Вернемся к идее устойчивого развития биосферы и общества. Правильность теории порогового кризиса биосферы В.Г. Горшкова означала бы невозможность дальнейшей экономической деятельности, и тогда ни о какой коэволюции природы и общества, по Н.Н. Моисееву, говорить не пришлось бы. Наоборот, применяемая в данной работе методика моделирования реальных процессов на базе нелинейных динамических моделей, альтернативная линейному подходу В.Г. Горшкова, позволяет получать более адекватные результаты и на их базе предлагать и исследовать новые идеи устойчивого развития.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Арский Ю.М., Данилов-Данильян В.И., Залиханов М.Ч.* и др. Экологические проблемы: что происходит, кто виноват и что делать? — М.: Изд. МИЭПУ, 1997.
- [2] *Базилевич Н.И.* Продуктивность, биохимия современной биосферы и функциональные модели экосистем // Почвоведение. — 1979. — № 2. — С. 5—21.
- [3] *Голубев В.С., Тарко А.М., Малиновский Ю.М., Савенко В.С.* Вечные русские вопросы в учебном пособии (Полемические заметки) // Общественные науки и современность. — 1997. — № 5. — С. 159—166.
- [4] *Горшков В.Г.* Пределы устойчивости биосферы и окружающей среды. — Л.: ЛИЯФ, препринт № 1336, 1987.
- [5] *Горшков В.Г.* Энергетика биосферы и устойчивость состояния окружающей среды // Итоги науки и техники, серия теоретические и общие вопросы географии. Т. 7. — М.: ВИНТИ, 1990.
- [6] *Кауричев И.С.* Почвоведение. — М.: Колос, 1975.
- [7] *Кудеяров В.Н.* Интенсивность процессов азотного цикла в почве при применении азотных удобрений // Изв. АН СССР, сер. Биол. — 1982. — № 5. — С. 660—669.

- [8] Лосев К.С., Горшков В.Г., Кондратьев К.Я. и др. Проблемы экологии России. — М., 1993.
- [9] Фатьянов А.С., Тайчинов С.Н. Почвоведение. — М.: Колос, 1972.
- [10] Likens G.E., Borman F.H., Johnson N.M. Interaction between major biogeochemical cycles in terrestrial ecosystems // Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles. SCOPE 17. — N.Y.: Willey. — 1981. — P. 93—112.
- [11] Marland G., Boden T., Andres B. Global CO<sub>2</sub> Global CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751—2008. NDP-030 // Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2011.
- [12] Rosswall T. The Biogeochemical Nitrogen Cycle // Some Perspectives of the Major Biogeochemical Cycles. SCOPE 17. — N.Y.: Willey, 1981.
- [13] Schlesinger W.H. Carbon Cycle in Terrestrial Detritus // Ann. Rev. Ecol. Syst. —1974. — N 8. — P. 51—81.

## MODELING OF A GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLE OF CARBON AND NITROGEN IN SYSTEM THE ATMOSPHERE — PLANTS — THE SOIL

A.I. Kurbatova<sup>1</sup>, A.M. Tarko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecological Faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
Podolskoye shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093

<sup>2</sup>Dorodnitsyn Computing Center, Russian Ac. Sc.  
Vavilov str., 40, Moscow, Russia, 119991

Modeling of a global biogeochemical cycle of carbon and nitrogen against a background of global warming and other anthropogenous impacts of the biosphere have been carried out. Results of modeling revealed unsoundness of the theory of threshold crisis of the biosphere.

**Key words:** anthropogenous influence, global cycle of carbon, biospheric parameters.