

УДК 574.4:52-17

Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах*

Е.А. Дюкарев, С.П. Семенов

Югорский государственный университет (Ханты-Мансийск, Россия)

Numerical Modeling of Biogeochemical Carbon Cycles in Swamp Ecosystems

E.A. Dyukarev, S.P. Semenov

Yugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia)

Предложена динамическая модель биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах. Существуют быстрые и медленные биогеохимические циклы. Быстрые циклы действуют в биосфере и включают фотосинтез, вегетативный рост и разложение. Болотные экосистемы являются одним из значимых резервуаров биогеохимических циклов. Известно, что в болотах законсервированы огромные запасы углерода в виде слабо разложившегося органического вещества и они являются активными источниками метана и стоком углекислого газа из атмосферы.

Математические модели динамических процессов в экологии можно разделить на две категории: количественные и качественные. Количественные модели, как правило, направлены на решение задач прогнозирования числовых показателей динамики реальных систем. Чтобы успешно применять количественные модели, они должны быть модифицированы с учетом специфических климатических условий, особых видов болотных растений, растительности и гидрологического режима.

Качественные модели, записанные как системы дифференциальных уравнений, предполагают нахождение особых точек, их классификацию и исследование на устойчивость, построение фазовых портретов и т.п. Такие модели редко поддаются количественной проверке, но дают важные знания и понимание процессов в природе.

Проведено качественное исследование системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих циклы углерода, исследованы типы особых точек, построены интегральные кривые и фазовые портреты.

Ключевые слова: круговорот углерода, парниковый эффект, биогеохимический цикл, математическая модель, особые точки, фазовый портрет, фокус, предельный цикл.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-16

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и правительства Ханты-Мансийского автономного округа-ЮГРЫ (Грант № 22-11-20031).

Введение

Последние десятилетия характеризуются нарастающими глобальными изменениями климата. Общепринято считать, что планетарные изменения климата связаны с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере Земли. К основным парниковым газам относят водяной пар (создающий от 36 до 72 % парникового эффекта), углекислый газ (9–26 %), метан (4–9 %), озон (3–7 %), оксиды азота и фреоны [1].

Открытие парникового эффекта приписывают французскому математику и физика Жозефу Фурье [2]. В середине XIX в. ирландский физик Джон Тиндалл впервые измерил инфракрасное поглощение и излучение различных газов и паров. Первое количественное предсказание глобального потепления из-за возможного удвоения атмосферного углекислого газа было сделано шведским ученым Сванте Аррениусом в 1896 г.

Хотя парниковые газы присутствуют в атмосфере в очень малом количестве (так, концентрация двуокси углерода составляет примерно 405 частей на миллион (ppm), а метана на два порядка меньше), однако повышение содержания парниковых газов в атмосфере приводит к росту температуры атмосферы.

В связи с этим исследование биогеохимических циклов углерода приобретают особую актуальность. Углерод, как один из наиболее распространенных элементов, связанных с органическими молекулами, может принимать различные химические формы, которые могут длительно существовать в различных резервуарах: в атмосфере, в океане, на поверхности Земли и под ее поверхностью. Углерод перемещается между резервуарами в процессе обмена, называемого углеродным циклом. Биогеохимическим циклом углерода принято называть его круговорот между живыми организмами и окружающей их средой [3]. Следует заметить, что экологические системы имеют множество биогеохимических циклов, например, круговорот азота, водорода, серы, фосфора и т.п.

Существуют быстрые и медленные биогеохимические циклы [3]. Быстрые циклы действуют в биосфере. Медленные, или геологические, циклы перемещают вещества через земную кору между камнями, почвой, океаном и атмосферой и могут длиться до нескольких миллионов лет. Быстрые, или биологические, циклы могут завершаться в течение нескольких лет, перемещая вещества из атмосферы в биосферу, а затем обратно в атмосферу.

Наряду с глобальными циклами выделяют также регионально-зональные циклы [4], между ними существует тесная связь: глобально действующие факторы во многом определяют региональные процессы, но и глобальные процессы испытывают обратное воздействие процессов регионального масштаба. Локально действующие факторы придают им местные особен-

сти, обуславливают специфические особенности, поскольку каждая территория обладает индивидуальными свойствами, от которых зависят условия формирования запасов углерода в резервуарах, мощность потоков и скорость потоков между резервуарами.

Болотные экосистемы являются одним из значимых резервуаров биогеохимических циклов. Известно, что в болотах законсервированы огромные запасы углерода в виде слабообразованного органического вещества и они являются активными источниками метана и стоком углекислого газа из атмосферы.

1. Математические модели биогеохимических циклов

Болотные экосистемы достаточно хорошо представлены в биогеохимических моделях [5]. К моделям биогеохимических циклов относятся модели углеродного цикла, включающие модели потоков углекислого газа, фотосинтеза болотной растительности, эмиссии углекислого газа и метана, трансформации органического вещества почвы, азотного и фосфорного циклов, процессов накопления микро- и макроэлементов, в том числе тяжелых металлов и радионуклидов в болотах. Динамические процесс-ориентированные модели, которые включают в себя рост растительности и динамику углерода или азота, могут быть использованы для описания углеродных функций водно-болотных угодий [6], популярны модели Phragmites и Turpha [7]. Математические модели глобальных циклов углерода в биосфере содержатся в монографиях [8] и [9]. Математические модели болотных экосистем на основе диаграмм «запасы — потоки» изучались в работе [10]. В работе [11] исследуется глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере при условии, что антропогенные выбросы углерода в атмосферу отсутствуют, приведены параметрические портреты модели, исследована устойчивость стационарного состояния.

В настоящее время не существует единой модели, подходящей для применения на всех типах болотных экосистем, но имеется ряд моделей, которые можно адаптировать для расчетов гидротермического режима и биогеохимических циклов болот. Хотя все модели используют схожие подходы к описанию углеродного пула, они не содержат достаточно подробных данных о конкретных характеристиках болотных систем, включая природу потоков углерода и подробное описание соответствующих микробных процессов. В работе [12] рассмотрен набор моделей экосистемного углерода, связанных с ассимиляцией данных (DALEC), набор включает 16 связанных моделей наземного углеродного цикла средней сложности. Каждый вариант модели отслеживает состояние и динамику как живых, так и мертвых углеродных пулов, их взаимодействие и реакцию на метеорологию и возмущения, такие как пожар или отмирание биомассы. В указанной работе исследовалась оп-

тимальная сложность модели для прогнозирования земного углеродного цикла.

2. Динамическая модель углеродного обмена

Схему углеродного цикла в болотных экосистемах (рис. 1) представим в виде двух главных взаимодействующих пулов органического углерода:

Live — фитомасса, живые части растений (листья, ствол, корни и пр.).

Mort — мортмасса, отмершие части растений (стволы, корни, ветошь, опад, почвенная подстилка, гумус, торф).

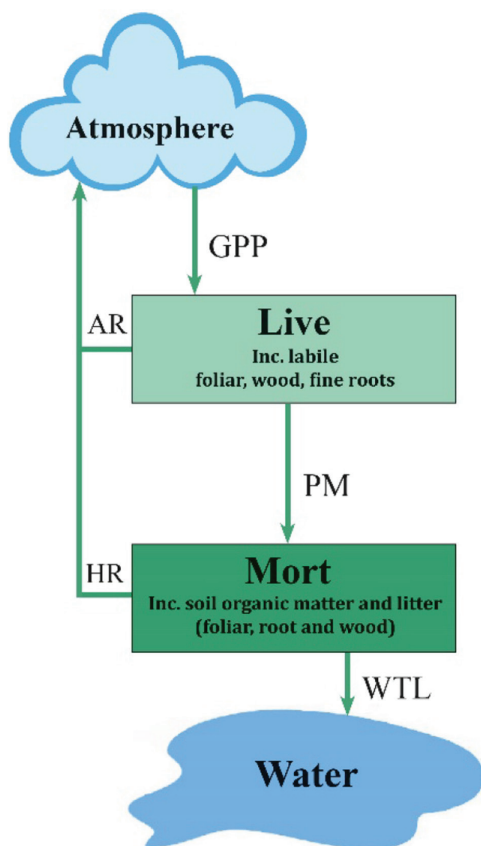


Рис. 1. Схема круговорота углерода в болотной экосистеме

Основными потоками в углеродном цикле будут:

- ассимиляция углекислого газа зелеными частями растений из атмосферы в процессе фотосинтеза — валовая первичная продукция (GPP — gross primary production);
- дыхание растений (AR — autotrophic respiration);
- отмирание живых частей растений (PM — plant mortality);
- разложение мертвого органического вещества микробами и возвращение его в виде углекислого газа или метана (в анаэробных условиях) обратно в атмосферу (HR — heterotrophic respiration).
- вынос углерода из почвы грунтовыми водами (WTL);

- потери углерода в экосистеме вследствие пожаров и изменений климата и растительного покрова (D);

- чистая первичная продукция (NPP — net primary production) — количество углерода, ассимилированного растительностью за вычетом дыхания растений $NPP = GPP - AR$;

- экосистемное дыхание (ER — ecosystem respiration) — сумма автотрофного и гетеротрофного дыхания;

- чистый экосистемный обмен (NEE) — разность валовой первичной продукции и экосистемного дыхания.

Предполагается, что содержание углекислого газа в атмосфере и океане велико и не изменяется в результате круговорота углерода в наземной растительности.

Обозначим: $x(t)$ и $y(t)$ — концентрации углерода в фитомассе растений и, соответственно, мортмассе в момент времени t .

Естественно предположить, что скорость изменения содержания углерода в фитомассе определяется чистым экосистемным обменом с учетом отмирания живых частей растений PM , учитывая, что $NEE = GPP - (AR + HR)$, получаем:

$$\frac{dx}{dt} = GPP - (AR + HR) - PM. \quad (1)$$

Далее, предположим, что валовая первичная продукция экосистемы пропорциональна текущим запасам углерода в фитомассе. Данное предположение оправдано для некоторых типов экосистем. Например, для низкопродуктивных болотных экосистем.

$$GPP = a(t) * x. \quad (2)$$

Результат дыхания растений и разложения растительных остатков запишем следующим образом:

$$AR + HR = b(t) * (x + y) * x. \quad (3)$$

Переменные $a(t)$ и $b(t)$ определяются через факторы окружающей среды, в том числе нелинейно зависят от фотосинтетической активной радиации (PAR), площади листовой поверхности, температуры и влажности воздуха (VPD, T), осадков и уровня грунтовых вод (WTL).

Для моделирования процесса отмирания живых частей растений PM введем понятие «коэффициент отмирания», чтобы ограничить «коэффициент отмирания» при возрастании $x(t)$, предлагается взять его в виде $\frac{c * x}{x + D}$ (трофическая функция Моно), тогда:

$$PM = \frac{c * x}{x + D} * y. \quad (4)$$

Подставляем последовательно выражения (2)–(4) в (1), получим:

$$\frac{dx}{dt} = x(a - b(x + y)) - \frac{c * xy}{x + D}. \quad (5)$$

Для получения уравнения для второй переменной $y(t)$ введем величину j как количество фитомассы, необходимое для формирования единицы мортотомассы. Тогда в момент времени t фитомасса $x(t)$ может сформировать не более чем $\frac{x}{j}$ единиц мортотомассы. Далее построим уравнение так, чтобы количество мортотомассы не превышало критическую величину $\frac{x}{j}$.

Для болотных экосистем это будет аналогом определения теоретического роста торфяной толщи:

$$\frac{dy}{dt} = s \left(1 - \frac{j}{x} * y \right) * y. \quad (6)$$

Таким образом, предлагается следующая динамическая модель круговорота углерода в болотной экосистеме:

$$\frac{dx}{dt} = x(a - b(x + y)) - \frac{c * xy}{x + D}$$

$$\frac{dy}{dt} = s \left(1 - \frac{j}{x} * y \right) * y \quad (7)$$

$$x(0) = x_0, y(0) = y_0.$$

Дальнейшее исследование модели (7) будет происходить в предположении, что a, b, c, D, s, j — положительные константы.

3. Численное моделирование динамики болотной экосистемы

Система уравнений (7) представляет собой аналог классической модели Холлинга-Тэннера для динамики биологических популяций [13].

Как видно из рисунка 2, существует равновесие (неподвижная точка) системы (7), лежащая в 1 квадранте (точка пересечения кривых).

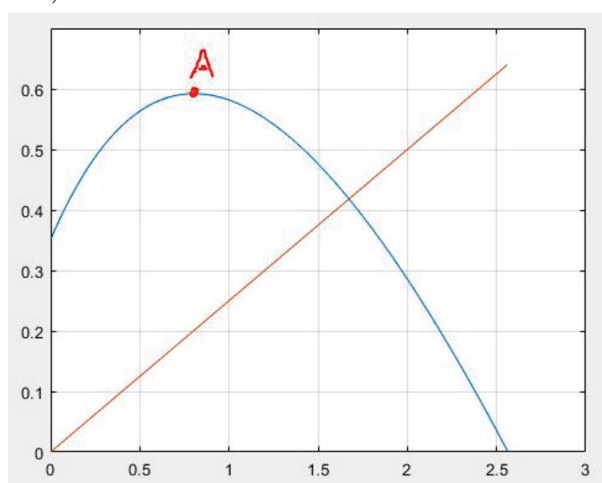


Рис. 2. неподвижная точка модели (7)

В зависимости от значений параметров модели эта точка может лежать (а) левее точки A или (б) правее точки A. В работе [13] аналитически доказывалось, что при выполнении дополнительного условия:

$$S < \frac{x^* * (a - bD - 2bx^*)}{D + x^*}, \quad (8)$$

где (x^*, y^*) — координаты неподвижной точки, на фазовом портрете системы (7) имеется устойчивый предельный цикл для случая (а) либо устойчивый фокус для случая (б).

Для модели (7) построена численная реализация в среде MATLAB с помощью функции ode45, использующей метод Рунге-Кутты. Был проведен ряд экспериментов с различными значениями параметров модели, в частности, исследованы типы особых точек, построены интегральные кривые и фазовые портреты. Полученные в ходе экспериментов результаты соответствуют теоретическим выкладкам, представленным в [13] для модели Холлинга-Тэннера, что позволяет говорить о том, что модели являются адекватными и могут использоваться для исследования динамики углерода.

Примеры результатов представлены на рисунке 3: в эксперименте слева наблюдается предельный цикл, справа — устойчивый фокус.

Интерпретировать полученные результаты можно следующим образом. Устойчивый фокус представляет собой стабильное состояние болотной экосистемы, которое действительно слабо изменяется с течением времени. Олиготрофные болотные комплексы при со-

хранении гидрологического режима могут существовать тысячами практически в неизменном состоянии. Колебательный режим в модели (7) можно представить как существование комплексных болотных экосистем, где области с повышенными и пониженными запасами фитомассы (гряды и мочажины) чередуются в пространстве.

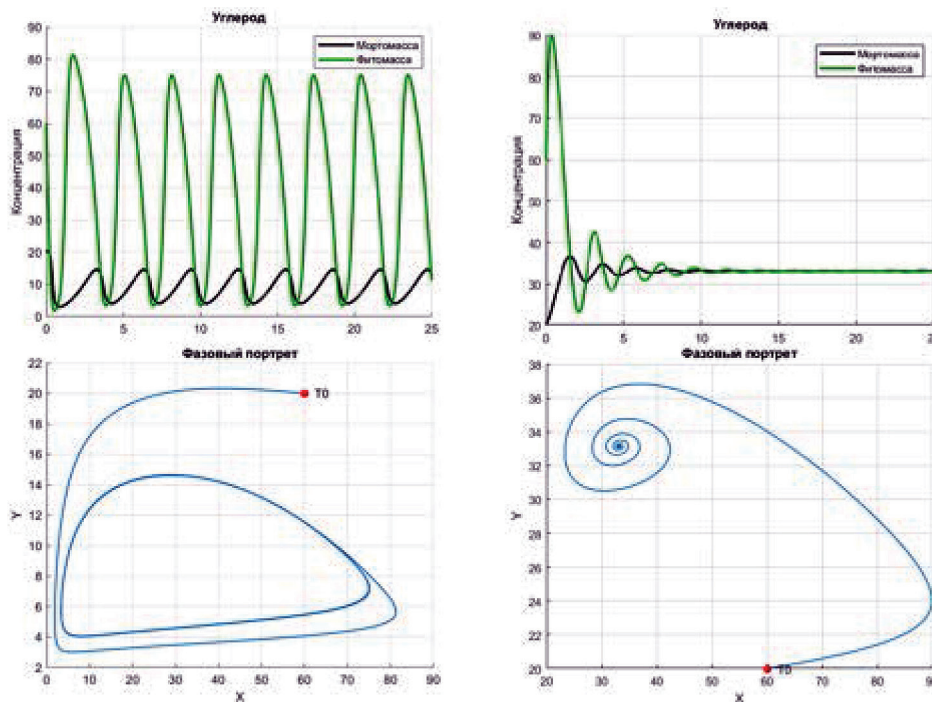


Рис. 3. Значения параметров: $x(0)=60, y(0)=20, a=10, b=0.1, c=21, D=10, s=1, j=2$ (слева); $x(0)=60, y(0)=20, a=15, b=0.1, c=21, D=50, s=0,75, j=1$ (справа)

Стоит отметить, что в представленных результатах $s^*j < a$, таким образом, учтена ключевая особенность болотных экосистем, а именно — их незамкнутость: болотные экосистемы возвращают в атмосферу меньшее количество CO_2 , чем поглощают в процессе фотосинтеза, аккумулируя в себе таким образом углерод.

Заключение

В статье рассмотрено численное моделирование болотных экосистем, которые являются одним из значимых резервуаров биогеохимических циклов. Проведено качественное исследование системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих циклы углерода, исследованы типы особых точек, построены интегральные кривые и фазовые портреты.

Интерпретировать полученные результаты можно следующим образом. Устойчивый фокус представляет собой стабильное состояние болотной экосистемы, которое действительно слабо изменяется с течением времени. Олиготрофные болотные комплексы при сохранении гидрологического режима могут существовать тысячами практически в неизменном состоянии. Колебательный режим динамики можно представить как существование комплексных болотных экосистем, где области с повышенными и пониженными запасами фитомассы (гряды и мочажины) чередуются в пространстве.

Полученные результаты носят теоретический характер и раскрывают одну из значимых проблем качественного исследования закономерностей биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах.

Библиографический список

1. Список парниковых газов МГЭИК. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IPCC_list_of_greenhouse_gases&oldid=1087125822 (дата обращения: 06.06.2022).
2. Блог *Стива Истербрука*. <http://www.easterbrook.ca/steve/2015/08/who-first-coined-the-term-greenhouse-effect/>.
3. Сайт: Обсерватория Земли НАСА. Углеродный цикл. <https://earthobservatory.nasa.gov>.
4. Кашапов Р.Ш. Основные факторы и особенности пространственно-временной дифференциации углеродных циклов // Вестник Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о земле. 2008. Вып. 1.
5. Janse J.H., van Dam A., Hes E.M.A., de Klein J.J.M., Finlayson M. et al. Towards a global model for wetlands ecosystem services // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2019. № 36.
6. Farmer J., Matthews R., Smith J.U., Smith P., Singh, B.K. Assessing existing peatland models for their applicability for modelling greenhouse gas emissions from tropical peat soils. Curr. Opin. Environ. Sustain. 2011. № 3.
7. Asaeda T., Baniya M.B., Rashid M.H. Effect of floods on the growth of *Phragmites japonica* on the sediment bar of regulated rivers: a modelling approach // Int J River Basin Manage. 2011. № 9.
8. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов // Математическое моделирование. М., 2005.
9. Кондрачев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М., 2004.
10. Завалишин Н.Н., Логофет Д.О. Моделирование экологических систем по заданной диаграмме «запасы — потоки» // Математическое моделирование. 1997. Т. 9. № 9.
11. Федотов А.М., Медведев С.Б., Пестунов А.И., Пестунов И.А. О нестандартном поведении минимальной модели углеродного цикла // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9. Вып. 1.
12. Famiglietti C.A., Smallman T.L., Levine P.A., Flack-Prain S. et al. Optimal model complexity for terrestrial carbon cycle prediction // Biogeosciences. 2021. № 18. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2727-2021>.
13. Эрроусмит Д.К., Плейс К. Обыкновенные дифференциальные уравнения: Качественная теория с приложениями. М., 1986.