

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА
В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ХОЛОДНЫХ
РЕГИОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

С. П. Семёнов, Е. А. Дюкарев, А. О. Ташкин

Аннотация. Изучение динамики запасов углерода болотных экосистем позволит более точно оценивать вклад водно-болотистых угодий в глобальное изменение климата. В данной работе предлагается нульмерная математическая модель, описывающая динамику углерода локальной (в масштабе водораздела) болотной экосистемы с учетом температуры окружающей среды. В предлагаемой модели выделены два резервуара углерода: фитомасса растений и органический углерод в мёртвой массе. Основные процессы модели включают фотосинтез, дыхание, отмирание фитомассы и вымывание углерода грунтовыми водами. Проведены численные эксперименты, показывающие, как изменение температуры окружающей среды влияет на динамику запасов углерода в болотных экосистемах.

DOI: 10.25587/2411-9326-2024-1-102-115

Ключевые слова: математические модели, динамика углерода, болотные экосистемы, окружающая среда, численные эксперименты.

Общепринято считать, что глобальные изменения климата связаны с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере Земли. При этом одним из главных компонентов парниковых газов является углерод. Биогеохимические модели играют важную роль в исследованиях изменения климата и экосистем, описывая процессы углеродного, азотного, и фосфорного циклов, трансформацию органических веществ в почвах и накопление микро- и макроэлементов.

Водно-болотистые угодья (болотные экосистемы) занимают значительную часть поверхности Земли, являются крупными хранилищами законсервированных органических веществ и служат активным источником выбросов метана и углекислого газа в атмосферу. В болотных экосистемах регионов с низкой температурой, в частности, Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) накоплено значительное количество углерода.

В работах [1, 2] утверждается, что в условиях низких температур поглощение углекислого газа поверхностной растительностью болотных экосистем через фотосинтез происходит с более высокой скоростью, чем разложение и дыхание. Это связано с особенностями температурной зависимости ферментов,

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 22-11-20031.

© 2024 Семёнов С. П., Дюкарев Е. А., Ташкин А. О.

участвующих в фотосинтезе болотных растений: при понижении температуры их активность может возрасти. Кроме того, болотные растения адаптированы к низким температурам и способны поглощать углекислый газ ночью. Еще один фактор — повышенная при холоде растворимость CO_2 , что облегчает его усвоение растениями. В холодных условиях болот снижается интенсивность дыхания, что позволяет растениям направлять больше ресурсов на фотосинтез.

Изменение климата, в том числе возрастающие условия потепления и высыхания, оказывают большое влияние на баланс между дыханием почвы и первичной продукцией и может превратить водно-болотные угодья из накопителя в источник выбросов CO_2 в атмосферу. Актуальной задачей является проведение исследования динамики запасов углерода в холодных регионах в связи с растущим значением этого фактора в контексте глобального потепления.

В настоящее время имеется значительное количество моделей, посвященных вопросам круговорота углерода в глобальном и региональном масштабах. Из наиболее известных можно выделить модель, описывающую глобальный круговорот углерода [3]. В работе [4] рассматривается глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере при условии, что антропогенные выбросы углерода в атмосферу отсутствуют. Рассматриваемая в работе минимальная модель, разработанная С. Т. Барцевым и др. [5], записывается в виде системы из трех уравнений. Первое уравнение описывает динамику углерода в биомассе живых растений, второе — динамику углерода органических остатков и третье — закон сохранения массы углерода. В работе [6] рассмотрена современная локальная модель углеродного цикла, описаны взаимодействия между многими критическими факторами почвы, гидрологии и растительности. Описана авторская модель Wetland-DNDC динамики углерода и выбросов метана (CH_4) в болотных экосистемах. В работе [7] описано 16 различных по структуре моделей углеродного цикла DALEC (Data Assimilation Linked Ecosystem Carbon). Модели откалиброваны на шести глобально распределенных участках земной поверхности с длинными временными рядами наблюдений и по 42 сценариям данных. Классическая модель Ферхюльста также часто используется в литературе по математическому моделированию экологических процессов. Существуют различные модели такие, как DNDC (Zang et al., 2002), Papyrus Simulator (Hes et al., 2014), Phragmites и Typha (Asaeda et al., 2011), PCLake-marsh (Sollie et al., 2008), Peatland-VU (van Huissteden et al., 2006), PEATBOG (Wu and Blodau, 2013), Phragmites C (Soetaert et al., 2004), и SWAT (Olchev 2009). Несмотря на то, что болотные экосистемы достаточно хорошо представлены в биогеохимических моделях, изучение концентрации углерода в водно-болотистых угодьях и связанных с этим глобальных изменений климата продолжает оставаться важной задачей для научного сообщества (Farmer et al., 2011).

В настоящей работе представлено дальнейшее развитие созданной авторами локальной модели динамики углерода в болотных экосистемах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) [8]. Представляемая авторами мо-

дель основывается на результатах предыдущих исследований авторов и является экспериментом по моделированию процессов болотных экосистем в регионе ХМАО для исследования динамики углерода. Моделирование ключевых процессов дает возможность оценить баланс углерода в заболоченных территориях региона в зависимости от различных условий. Рассматриваемые в предложенной модели процессы такие, как фотосинтез, дыхание, изменение температуры и уровня грунтовых вод, являются общими для всех регионов с холодным климатом, поэтому подход, реализованный в модели, может быть применен для изучения динамики углерода аналогичных болотных экосистем.

Авторами работы разработана оригинальная нульмерная математическая модель, отражающая взаимосвязь между выбранными факторами окружающей среды и запасами углерода в водно-болотистых угодьях. Модель учитывает взаимосвязь ключевых факторов окружающей среды и позволяет оценить значимость болотных экосистем в качестве углеродных резервуаров. Основными преимуществами разработанной модели являются:

- учет специфики болотных экосистем северного региона Западной Сибири по сравнению с другими локальными экосистемами;
- детализация основных компонентов углеродного цикла применительно к условиям болотных экосистем с холодным климатом;
- исследование чувствительности пулов и потоков углерода к динамике температуры, гидрологии и других факторов.

На основе разработанной модели выполнено моделирование динамики пулов углерода в зависимости от температуры и других важных параметров. Результаты моделирования демонстрируют чувствительность баланса углерода к изменениям рассматриваемых факторов и позволяют определить наиболее значимые из них, которые способны оказать существенное влияние на аккумуляцию углерода в подобных экосистемах.

Предложенная модель может быть использована для прогнозирования отклика болотных экосистем на изменения климата и окружающей среды, а полученные результаты позволяют определить факторы, которые могут привести к существенным изменениям концентрации углерода в болотных экосистемах и оказать негативное воздействие на глобальный климат.

1. Математическая модель динамики углерода с учетом температуры

Предполагается, что наблюдаемая болотная экосистема состоит из двух взаимосвязанных резервуаров углерода: *Live* и *Mort*. Пул *Live* состоит из углерода, содержащегося в живой растительности, такой как листья, стволы и корни и т. п. соответственно, пул *Mort* представляет собой углерод, находящийся в отмерших частях растений (ветошь, опад, почвенная подстилка, гумус, торф и др. — мортотомасса).

Основными процессами в круговороте углерода являются: ассимиляция углекислого газа зелеными частями растений при фотосинтезе (валовая пер-

вичная продукция, GPP), дыхание растений (автотрофное дыхание, Ra), отмирание растительной биомассы (растительная смертность, PM), разложение органического материала микроорганизмами и возвращение его в виде углекислого газа или метана обратно в атмосферу (гетеротрофное дыхание, Rh), а также вынос углерода из почвы грунтовыми водами (Wtl) в реки и далее в океан. Предполагается, что содержание углерода в атмосфере и океане велико и практически не изменяется в результате круговорота углерода в рассматриваемой локальной болотной экосистеме.

Объемы пулов $Live$ и $Mort$ зависят от многих факторов (солнечная радиация, площадь листы, температура, уровень грунтовых вод и т. п.). Одним из самых значимых факторов является температура. В данной работе исследуется динамика пулов в зависимости от температуры окружающей среды.

Введем следующие обозначения: $x(t)$ и $y(t)$ — количество углерода в фитомассе и соответственно мормассе в момент времени t .

Скорость изменения количества углерода в пуле живой биомассы (фотосинтетическом углероде) может быть выражена следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = (GPP - Ra) \cdot x - PM \cdot y, \quad (1)$$

где величины GPP , Ra , PM введены выше.

В свою очередь, скорость изменения количества углерода в мормассе может быть описана так:

$$\frac{dy}{dt} = (Grow - Rh) \cdot y - Wtl, \quad (2)$$

где величина $Grow$ — темп прироста углерода в мормассе в результате отмирания живой биомассы; величины Rh , Wtl описаны выше.

Ключевым фактором баланса углекислого газа между экосистемой и атмосферой является валовая первичная продукция (GPP), которая представляет собой темп поглощения углерода посредством фотосинтеза в единицу времени и на единицу площади. Фотосинтетический углерод нужен для синтеза органических соединений, которые служат растениям источником энергии и строительным материалом для клеток и тканей, при этом часть его возвращается в атмосферу в результате автотрофного дыхания.

Принято считать, что валовая первичная продукция является функцией фотосинтетически активной радиации, с учетом модифицирующих факторов [9–12]:

$$GPP = f(PAR) \cdot f(LAI) \cdot f(T) \cdot f(VPD), \quad (3)$$

где PAR — фотосинтетически активная радиация; остальные факторы отражают соответственно: $f(LAI)$ — влияние площади листовой поверхности на фотосинтез, $f(T)$ — колебание температуры и $f(VPD)$ — воздействие влажности воздуха.

Следует отметить, что в модели круговорота углерода, рассматриваемой в работе [13], предполагалось, что величина GPP является положительной кон-

стантой. В данной работе считается, что валовая первичная продукция является функцией температуры окружающей среды, т. е.

$$GPP = a \cdot f(T). \quad (4)$$

Относительно остальных факторов (радиация, листовая поверхность, влажность) предполагается, что они постоянны и входят в неотрицательную константу a .

Во многих исследованиях [7, 14, 15] установлено, что фотосинтез увеличивается с температурой, пока не достигнет оптимума в точке T_{opt} (например, 20–25°C), выше которой, в точке T_{max} , фотосинтез ингибируется, при этом существует также и минимальная температура T_{min} , ниже которой процессы фотосинтеза отсутствуют. Конкретный выбор функции $f(T)$ будет проведен ниже, в описании численных экспериментов.

Для описания автотрофного дыхания Ra в научных публикация чаще всего используется модель, основанная на кинетике ферментов, которая заимствована из модели двойной кинетики Аррениуса и Михаэлиса — Ментен (Arrhenius and Michaelis–Menten) [16]. Эта модель предполагает, что Ra является функцией количества углерода в фитомассе $x(t)$, температуры T и влажности. В данной работе Ra моделируется соотношением

$$Ra = b \cdot g(T) \cdot x. \quad (5)$$

Согласно кинетике ферментов дыхание экспоненциально увеличивается с температурой, однако конкретный вид функции $h(T)$ будет уточнен ниже.

Процесс отмирания живых частей (PM — plant mortality) таких, как листья, стебли или корни, является естественной частью жизненного цикла многих организмов и сопровождается химическими и биохимическими изменениями в тканях. Для моделирования отмирания растительности возможны различные подходы. Среди множества математических формулировок для процесса отмирания [17–19] в данной работе используется выражение

$$PM = \frac{c \cdot x}{x + Mp}, \quad (6)$$

где Mp — так называемая *константа половинного насыщения*, определяемая экспериментально, при которой изменение углерода в процессе отмирания достигает половины максимально возможного. Для получения выражения для темпа прироста углерода в пуле $Mort$ вследствие живой биомассы ($Grow$) введем величину j , которая представляет собой количество растительной биомассы, необходимое для формирования одной единицы мормомассы. Таким образом, в момент времени t количество углерода $x(t)$ может образовать не более чем x/j единиц углерода в пуле $Mort$:

$$Grow = s \cdot \frac{x}{j}. \quad (7)$$

Гетеротрофное дыхание Rh преимущественно контролируется температурой и влажностью почвы. Как правило, используют экспоненциальную зависимость, однако в литературе встречаются и другие функции. Достаточно полный обзор моделей приведен в [20].

В данной работе для гетеротрофного дыхания используется выражение, аналогичное (5):

$$Rh = d \cdot h(T) \cdot y. \quad (8)$$

Углерод, содержащийся в мормомассе, подвержен выносу грунтовыми водами и перемещается из мормомассы в водные системы такие, как реки, озера или подземные воды. Одной из наиболее известных моделей [21] является модель диффузии с утечкой. Эта модель учитывает концентрацию органического углерода в мормомассе, степень кислотности почвы, проницаемость почвенного слоя и потоки воды. В данной же работе вымывание органического углерода (Wtl) в локальной болотистой экосистеме «растения — почва» описывается в упрощенном виде:

$$Wtl = wtl \cdot y, \quad (9)$$

где wtl — константа.

Таким образом, с учетом упрощений и предположений, выраженных соотношениями (5)–(9), из (1), (2) вытекает следующая нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно искомых функций $x(t)$ и $y(t)$:

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot f(T) \cdot x - b \cdot h(T) \cdot x^2 - \frac{c \cdot x}{x + Mp} \cdot y, \quad \frac{dy}{dt} = s \cdot \frac{x}{j} \cdot y - d \cdot g(T) \cdot y^2 - wtl \cdot y.$$

Проведем еще одно преобразование уравнений в целях обезразмеривания искомых функций.

Обозначим через x_{max} и y_{max} максимально возможные запасы углерода в фитомассе и соответственно мормомассе рассматриваемой локальной экосистемы. Поделим первое уравнение системы на x_{max} и положим $\frac{x}{x_{max}} = \tilde{x}$, $\frac{y}{y_{max}} = \tilde{y}$. Дополнительно второе слагаемое в правой части первого уравнения поделим и умножим на x_{max} , а третье слагаемое поделим и умножим на $x_{max} \cdot y_{max}$. Аналогичные преобразования проведем со вторым уравнением. Результат запишем в следующем виде:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = a \cdot f(T) \cdot \tilde{x} - b' \cdot h(T) \cdot \tilde{x}^2 - \frac{c' \cdot \tilde{x}}{\tilde{x} + Mp'} \cdot \tilde{y}, \quad \frac{dy}{dt} = s \cdot \frac{\tilde{x}}{j'} \cdot \tilde{y} - d \cdot g(T) \cdot \tilde{y}^2 - wtl \cdot \tilde{y}.$$

Здесь обозначено:

$$Mp' = \frac{Mp}{x_{max}}; \quad b' = b \cdot x_{max}; \quad c' = c \cdot \frac{y_{max}}{x_{max}}; \quad j' = \frac{j}{x_{max}}.$$

Для удобства записи опустим штрихи и знак тильды у переменных. Таким образом, искомыми величинами являются обезразмеренные относительные запасы углерода $x(t)$, $y(t)$. Считается, что согласование остальных размерностей обеспечивается неотрицательными параметрами модели a, b, c, d, s, j, Mp .

Для дальнейшего исследования предлагается система (10), (11) с начальными условиями (12), которую далее будем называть базовой математической моделью динамики углерода с учетом температуры для локальных болотных экосистем:

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot f(T) \cdot x - b \cdot h(T) \cdot x^2 - \frac{c \cdot x}{x + Mp} \cdot y, \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dt} = s \cdot \frac{x}{j} \cdot y - d \cdot g(T) \cdot y^2 - wtl \cdot y, \quad (11)$$

$$x(0) = x_0, \quad y(0) = y_0. \quad (12)$$

2. Температурные зависимости и входные данные модели

При моделировании температурных функций $f(T)$, $g(T)$ и $h(T)$, определяющих процессы фотосинтеза, автотрофного и гетеротрофного дыханий предполагалось, что каждая из них имеет три основные температурные точки: минимальную $Tmin$, ниже которой процесса нет, оптимальную $Topt$, при которой производится максимум первичной продукции, и максимальную $Tmax$, выше которой также процесса нет. Например, нижняя температурная граница фотосинтеза у растений северных широт находится в пределах -15°C (сосна, ель) $-0,5^\circ\text{C}$, у некоторых лишайников был зарегистрирован фотосинтез при температуре до -25°C . У растений умеренного пояса в интервале $20-25^\circ\text{C}$ достигается максимальная интенсивность фотосинтеза. При температуре выше оптимальной интенсивность фотосинтеза резко падает, а дальнейшее повышение температуры до 40°C приводит к быстрому ингибированию процесса (при 45°C растения погибают). Кроме того, повышение температуры увеличивает интенсивность дыхания, и в этой связи разность между фотосинтезом и дыханием уменьшается [22].

Разумным компромиссом между отражением реальности и возможностью математического анализа является модель О'Нейла и др. [23]

В модели О'Нейла и др. введены три параметра, каждый из которых имеет вполне прозрачный физиологический смысл, благодаря этому она обладает определенным преимуществом перед другими моделями, в которых нет такой интерпретации параметров. Два параметра уже упоминались выше, это температурные точки: $Topt$ и $Tmax$. Третьим параметром является величина Q_{10} , которая выражает относительное изменение в скорости протекания процессов при повышении температуры на 10°C . Если обозначить через $p(T)$ количество произвольной первичной продукции, то модель О'Нейла представима в виде

$$\frac{p}{p(T_{opt})} = \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right)^{XT} \cdot \exp \left[XT \cdot \left(\frac{T - T_{opt}}{T_{max} - T_{opt}} \right) \right], \quad (13)$$

где

$$XT = WT^2 \cdot \frac{(1 + \sqrt{1 + \frac{40}{WT}})^2}{400}, \quad WT = (T_{max} - T_{opt}) \cdot \ln(Q_{10}).$$

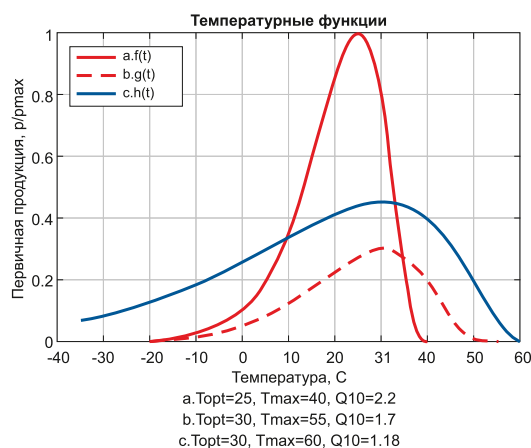


Рис. 1. Модели температурных зависимостей процессов фотосинтеза и дыхания.

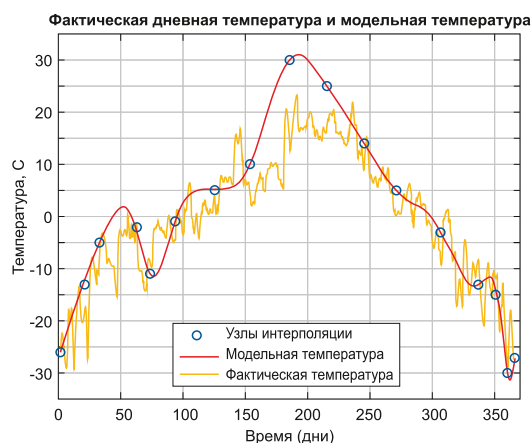


Рис. 2. Модельная температура.

На рис. 1 приведены графики функций $f(T)$, $g(T)$ и $h(T)$, используемые в системе (10)–(12), причем значения функций $g(t)$ и $h(t)$ масштабированы с коэффициентами 0.3 и 0.45 соответственно.

Компьютерная реализация математической модели (10)–(12) и дальнейшие исследования проводились в вычислительной среде MatLab. В качестве единицы модельного времени выбран день, а базовым наблюдаемым период — год. На основе измерений температуры на метеостанции научного полигона Мухрино был сформирован годовой ход модельной температуры. На рис. 2 приведены фактические дневные температуры полигона, узлы интерполяции и график модельной температуры. Первый день на горизонтальной шкале соответствует 1 января 2021 г. и т. д. Максимальная модельная температура искусственно увеличена для того, чтобы резче выделить поведение фотосинтетической активности вблизи точек. Таким образом, для модельной температуры основные

показатели составили: $T_{max} = 30,8^{\circ}\text{C}$, $T_{min} = -31,3^{\circ}\text{C}$, среднегодовая температура 3°C .

Компьютерная модель и результаты численных экспериментов.

Для численных расчетов использовалась библиотека функций системы Matlab. Приближенное решение системы (10)–(12) находилось с помощью универсального решателя ODE45, реализующего метод Рунге — Кутты 4-го и 5-го порядков точности. Особенность функции ODE45 заключается в том, что она использует переменный шаг для приближенного решения дифференциальных уравнений. В силу этого возникает необходимость интерполирования коэффициентов уравнения, зависящих от температуры, в узлах расчетной сетки. Указанная интерполяция выполнялась с помощью библиотеки вычислительных функций системы Matlab методом сплайнов.

На рис. 3 представлена динамика относительных запасов углерода в течение календарного года. В окрестности дней, для которых температура превышала оптимальное значение для фотосинтеза (25°C), количество углерода в пуле *Live* резко сокращалось.



Рис. 3. Динамика относительных запасов углерода в течение календарного года.

3. Заключение и выводы

Основным результатом работы является разработка математической модели динамики углерода в локальной болотной экосистеме, которая отражает зависимости основных процессов круговорота углерода от температуры. Численные эксперименты показывают, что предлагаемая в работе математическая модель хорошо отражает годовые колебания температуры и соответственно определяет относительные изменения запасов углерода в обоих пулах болотной экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Melaku N. D., Wang J., Meshesha T. W. Modeling the dynamics of carbon dioxide emission

- and ecosystem exchange using a modified SWAT hydrologic model in cold wetlands // *Water*. 2022. V. 14, N 9. 1458. <https://doi.org/10.3390/w14091458>.
2. Bubier J. B., Gaytri M. T., Roulet N., Lafleur P. Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada // *Ecosystems*. 2003. N 6, P. 353–367.
 3. Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф. Моделирование глобального круговорота углерода // М.: Физматлит, 2004.
 4. Федотов А. М., Медведев С. Б., Пестунов А. И. Пестунов И. А. О нестандартном поведении минимальной модели углеродного цикла // *Вестн. НГУ, Сер. Информационные технологии*. 2011. Т. 9, № 1. С. 82–88.
 5. Барцев С. И., Дегерменджи А. Г., Ерохин Д. В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // *Докл. АН. Геофизика*. 2005. Т. 401, № 2. С. 233–237.
 6. Zhang Y., Li C., Trettin C., Sun G. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16, N 4. P. 9–17.
 7. Famiglietti C. A., Smallman T. L., Levine P. A., Flack-Prain S., Quetin G. R., Meyer V., Parazoo N. C., Stettin S. G., Yang Y., Bonal D., Bloom A. A., Williams M., Konings A. G. Optimal model complexity for terrestrial carbon cycle prediction // *Biogeosciences*. 2021. V. 18. P. 2727–2754.
 8. Semenov S. P., Dyukarev E. A., Tashkin A. O. Biogeochemical carbon cycles numerical modeling in wetland ecosystems // *Lobachevskii J. Math.* 2023. V. 44, № 3. P. 1223–1228.
 9. Monteith J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems // *J. Appl. Ecology*. 1972. V. 9. P. 747–766.
 10. Monteith J. L. Climate and efficiency of crop production in Britain // *Philos. Trans. Royal Soc. London B*. 1977. V. 281. P. 277–294.
 11. Goetz S., Prince S. Modelling terrestrial carbon exchange and storage: evidence and implications of functional convergence in light-use efficiency // *Adv. Ecol. Res.* 1999. V. 28. P. 57–92.
 12. Tian Y., Zhang Y., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Glassy J., Dedieu G., Running S. W. Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. V. 38. P. 2387–2401.
 13. Семёнов С. П., Ташкин А. О. Анализ моделей углеродного цикла применительно к исследованию болотных экосистем Западной Сибири // *Вестн. ЮргУ*. 2022. Т. 18, № 4. С. 145–152.
 14. Dong T., Wu B., Meng J., Du X., Shang J. Sensitivity analysis of retrieving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing data // *Acta Ecol. Sinica*. 2016. V. 36, N 1. P. 1–7.
 15. Deverel S., Oikawa P., Dore S., Mack S., Silva L. Restoration of California deltaic and coastal wetlands for climate change mitigation. // North Little Rock, Arkansas: American Carbon Registry, 2017.
 16. Davidson E. A., Samanta S., Caramori S. S., Savage K. The dual Arrhenius and Michaelis–Menten kinetics model for decomposition of soil organic matter at hourly to seasonal time scales // *Global Change Biology*. 2012. V. 18, N 1. P. 371–384.
 17. Tang J. Y., Riley W. J. A total quasi-steady-state formulation of substrate uptake kinetics in complex networks and an example application to microbial litter decomposition // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 8329–8351.
 18. Michaelis L., Menten M. L. The Kinetics of invertase action // *Biochemistry Z.* 1913. V. 49. P. 333–369.
 19. Bugmann H., Seidl R., Hartig F., Bohn F., Bruna J., Cailleret M. et al. Tree mortality submodels drive simulated long-term forest dynamics: assessing 15 models from the stand to global scale // *Ecosphere*. 2019. V. 10, N 2. 02616. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2616>.
 20. Dyukarev E. A., Kurakov S. A. Response of bare soil respiration to air and soil temperature variations according to different models: A case study of an urban grassland // *Land*. 2023. V. 12. 939. <https://doi.org/10.3390/land12050939>.

21. Maloszewski P., Zuber A. Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data in aquifers // Adv. Water Resources. 1993. V. 16, N 3. P. 173–190.
22. Овчинников Н. Н., Шиханова Н. М. Фотосинтез. М.: Просвещение, 1972.
23. O'Neill R. V., Goldstein R. A., Shugart H. H., Mankin J. B. Terrestrial ecosystem energy model. Eastern deciduous forest biome memo report Oak Ridge // Oak Ridge: The Environmental Sciences Division of the Oak Ridge National Laboratory, 1972.

Поступила в редакцию 20 декабря 2023 г.

После доработки 24 января 2024 г.

Принята к публикации 29 февраля 2024 г.

Семёнов Сергей Петрович

Югорский государственный университет,

ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск 628012

ssp@ugrasu.ru

Дюкарев Егор Анатольевич

Югорский государственный университет,

НОЦ-кафедра ЮНЕСКО «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата»

ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск 628012;

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Лаборатория физики климатических систем

пр. Академический 10/3, Томск 634021

dekot@mail.ru

Ташкин Артём Олегович

Югорский государственный университет,

ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск 628012

anozer_sky@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING
CARBON DYNAMICS IN WETLAND ECOSYSTEMS
OF COLD REGIONS OF WESTERN SIBERIA

S. P. Semenov, E. A. Dyukarev,
and A. O. Tashkin

Abstract: Studying the dynamics of carbon stocks in wetland ecosystems will allow us to more accurately assess the contribution of wetlands to global climate change. This work proposes a zero-dimensional mathematical model that describes the carbon dynamics of a local (at the watershed scale) wetland ecosystem, taking the ambient temperature into account. The proposed model identifies two carbon reservoirs: plant phytomass and organic carbon in mortmass. The main processes of the model include photosynthesis, respiration, phytomass die-off, and carbon leaching by groundwater. Numerical experiments were carried out to show how changes in ambient temperature affect the dynamics of carbon stocks in wetland ecosystems.

DOI: 10.25587/2411-9326-2024-1-102-115

Keywords: mathematical models, carbon dynamics, swamp ecosystems, wetlands, carbon, numerical experiments, environment.

REFERENCES

1. Melaku N. D., Wang J., and Meshesha T. W., “Modeling the dynamics of carbon dioxide emission and ecosystem exchange using a modified SWAT hydrologic model in cold wetlands,” *Water*, **14**, No. 9, 1458 (2022).
2. Bubier J. B., Gaytri M. T., Roulet N., and Lafleur P., “Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada,” *Ecosystems*, No. 6, 353–367 (2003).
3. Kondratyev K. Ya. and Krapivin V. F., *Modeling the Global Carbon Cycle* [in Russian], Fizmatlit, Moscow (2004).
4. Fedotov A. M., Medvedev S. B., Pestunov A. I., and Pestunov I. A., “On the non-standard behavior of the minimum model of the carbon cycle [in Russian],” *Vestn. Novosib. Gos. Univ., Ser. Inform. Tekhnol.*, **9**, No. 1, 82–88 (2011).
5. Bartsev S. I., Degermendzhi A. G., and Erokhin D. V., “Global minimum model of long-term carbon dynamics in the biosphere [in Russian],” *Dokl. Akad. Nauk, Geofiz.*, **401**, No. 2, 233–237 (2005).
6. Zhang Y., Li C., Trettin C., and Sun G., “An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems,” *Glob. Biogeochem. Cycles*, **16**, No. 4, 9–17 (2002).
7. Famiglietti C. A., Smallman T. L., Levine P. A., Flack-Prain S., Quetin G. R., Meyer V., Parazoo N. C., Stettin S. G., Yang Y., Bonal D., Bloom A. A., Williams M., and Konings A. G., “Optimal model complexity for terrestrial carbon cycle prediction,” *Biogeosci.*, **18**, 2727–2754 (2021).
8. Semenov S. P., Dyukarev E. A., and Tashkin A. O., “Biogeochemical carbon cycles numerical modeling in wetland ecosystems,” *Lobachevskii J. Math.*, **44**, No. 3, 1223–1228 (2023).

9. Monteith J. L., "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems," *J. Appl. Ecol.*, **9**, 747–766 (1972).
10. Monteith, J. L., "Climate and efficiency of crop production in Britain," *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B*, **281**, 277–294 (1977).
11. Goetz S. and Prince S., "Modelling terrestrial carbon exchange and storage: evidence and implications of functional convergence in light-use efficiency," *Adv. Ecol. Res.*, **28**, 57–92 (1999).
12. Tian Y., Zhang Y., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Glassy J., Dedieu G., and Running S. W., "Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **38**, 2387–2401 (2000).
13. Semenov S. P. and Tashkin A. O., "Analysis of carbon cycle models for research of wetland ecosystems in Western Siberia [in Russian]," *Vestn. Yur. Gos. Univ.*, **18**, No. 4, 145–152 (2022).
14. Dong T., Wu B., Meng J., Du X., and Shang J., "Sensitivity analysis of retrieving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing data," *Acta Ecolog. Sin.*, **36**, No. 1, 1–7 (2016).
15. Deverel S., Oikawa P., Dore S., Mack S., and Silva L., Restoration of California Deltaic and Coastal Wetlands for Climate Change Mitigation, Amer. Carbon Reg., North Little Rock, AR (2017).
16. Davidson E. A., Samanta S., Caramori S. S., and Savage K., "The Dual Arrhenius and Michaelis–Menten kinetics model for decomposition of soil organic matter at hourly to seasonal time scales," *Glob. Change Biol.*, **18**, 371–384 (2012).
17. Tang J. Y. and Riley W. J., "A total quasi-steady-state formulation of substrate uptake kinetics in complex networks and an example application to microbial litter decomposition," *Biogeosci.*, **10**, 8329–8351 (2013).
18. Michaelis L. and Menten M. L., "Die Kinetik der Invertinwirkung," *Biochem. Z.*, **49**, 333–369.
19. Bugmann H., Seidl R., Hartig F., Bohn F., Bruna J., Cailleret M., et al., "Tree mortality submodels drive simulated long-term forest dynamics: assessing 15 models from the stand to global scale," *Ecosphere*, **10**, paper ID 02616 (2019).
20. Dyukarev E. A. and Kurakov S. A., "Response of bare soil respiration to air and soil temperature variations according to different models: A case study of an urban grassland," *Land*, **12**, 939 (2023).
21. Maloszewski P. and Zuber A., "Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data in aquifers," *Adv. Water Res.*, **16**, No. 3, 173–190 (1993).
22. Ovchinnikov N. N. and Shikhanova N. M., Photosynthesis [in Russian], Prosveschenie, Moscow (1972).
23. O'Neill R. V., Goldstein R. A., Shugart H. H., and Mankin J. B., Terrestrial ecosystem energy model. Eastern deciduous forest biome memo report Oak Ridge, Environ. Div. Ridge Natl.

Lab., Oak Ridge (1972).

Submitted December 20, 2023

Revised January 24, 2024

Accepted February 29, 2024

Sergey P. Semenov
Yugra State University,
16 Chekhov Street, Khanty-Mansiysk 628012, Russia
`ssp@ugrasu.ru`

Egor A. Dyukarev
Yugra State University,
UNESCO Chair “Dynamics of the Environment and Global Climate Change,”
16 Chekhov Street, Khanty-Mansiysk 628012, Russia;
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
Laboratory of Physics of Climatic Systems,
10/3 Akademichesky Avenue, Tomsk 634021, Russia
`dekot@mail.ru`

Artem O. Tashkin
Yugra State University,
16 Chekhov Street, Khanty-Mansiysk 628012, Russia
`anozer_sky@mail.ru`