

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИССЛЕДОВАНИЮ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**Семёнов Сергей Петрович**

*доцент, кандидат физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,  
Ханты-Мансийск, Россия  
E-mail: ssp@ugrasu.ru*

**Ташкин Артём Олегович**

*Руководитель АНО «Центр развития социальных,  
научно-образовательных, культурно-экологических  
общественных инициатив «МИР»  
Ханты-Мансийск, Россия  
E-mail: anozer\_sky@mail.ru*

*Работа выполнена при поддержке РНФ, проект №22-11-20031*

*Предмет исследования: глобальные климатические процессы напрямую связаны с парниковыми газами (greenhouse gases, GHG). Основным парниковым газом в атмосфере является диоксид углерода, что делает актуальным проблему изучения динамики углеродного цикла. Особый интерес вызывает изучение болотных экосистем Западной Сибири, поскольку в них сосредоточены значительные запасы углерода.*

*Цель исследования: работа посвящена аналитическому обзору и анализу актуальных публикаций в области моделирования динамики углеродного цикла.*

*Методы и объекты исследования: рассмотрены наиболее популярные динамические модели, отражающие схемы и элементы глобального цикла углерода, а также функциональные зависимости потребления и выделения углерода.*

*Основные результаты исследования: приведены аналитические обзоры на изучение динамики парниковых газов болотных экосистем Западной Сибири.*

*Ключевые слова: парниковые газы, углерод, математические модели, цикл углерода, болотные экосистемы, Западная Сибирь.*

**THE CARBON CYCLE MODELS ANALYSIS AS APPLIED  
TO RESEARCH WETLAND ECOSYSTEMS IN WESTERN SIBERIA**

**Sergey P. Semenov**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Yugra State University  
Khanty-Mansiysk, Russia  
E-mail: ssp@ugrasu.ru*

**Artem O. Tashkin**

*Head of the Autonomous Nonprofit Organization  
"Development Center of Social, Scientific, Educational,  
Cultural and Environmental Public Initiatives "MIR",  
Khanty-Mansiysk, Russia  
E-mail: anozer\_sky@mail.ru*

*The work supports by the Russian Science Foundation, project No. 22-11-20031*

*Subject of research: global climate processes are directly related to greenhouse gases (greenhouse gases, GHG). The main greenhouse gas in the atmosphere is carbon dioxide, which makes the problem of studying the dynamics of the carbon cycle relevant. Of particular interest is the study of the swamp ecosystems of Western Siberia, since they contain significant carbon reserves.*

*Purpose of research: the work is devoted to an analytical review and analysis of current publications in the field of modeling the dynamics of the carbon cycle.*

*Methods and objects of research: the most popular dynamic models reflecting schemes and elements of the global carbon cycle, as well as functional dependencies of carbon consumption and release are considered.*

*Main results of research: analytical reviews of modern scientific results in the field of mathematical modeling of the carbon cycle scheme are given. There is a proposition of a carbon cycle model, which aimed at studying the dynamics of greenhouse gases in swamp ecosystems of Western Siberia.*

*Keywords: greenhouse gases, carbon, mathematical models, carbon cycle, swamp ecosystems, Western Siberia.*

---

## Введение

Глобальные климатические процессы тесно связаны с парниковым эффектом (greenhouse gases, GHG). Его открытие приписывают французскому математику и физика Жозефу Фурье. Основным парниковым газом в атмосфере является диоксид углерода, что делает актуальной проблему изучения динамики углеродного цикла.

Существующие математические модели углеродного цикла принято разделять на глобальные, включающие атмосферу и океан и локальные, включающие отдельные регионы планеты, либо отдельные экосистемы, например, болотные. Болота представляют собой экосистему, состоящую из трех основных компонентов: воды, специфической болотной растительности и торфа. Болота выполняют разнообразные специфические биосферные функции: аккумулятивную, биологическую, межкруговоротную, ландшафтную, газорегулирующую, геохимическую, гидрологическую и климатическую. Первые четыре из них являются незаменимыми, присутствующими только болотам [1]. Ключевой особенностью болотных экосистем является их незамкнутость: болотные экосистемы возвращают в атмосферу меньшее количество  $\text{CO}_2$ , чем поглощают в процессе фотосинтеза, аккумулируя в себе таким образом углерод [2]. Особый интерес вызывает изучение болотных экосистем Западной Сибири, поскольку в них сосредоточены значительные запасы углерода [3]. Болотные экосистемы играют существенную роль в глобальном углеродном цикле, являясь источниками и поглотителями парниковых газов [4, 5]. Болотные угодья занимают небольшую часть земной поверхности (не более 3,5%), но при этом хранят большое количество органического вещества (500–700 млрд. тонн) [6, 7]. В Западной Сибири болотные экосистемы занимают более 30% площади [8].

Целью данной работы является аналитический обзор актуальных публикаций в области моделирования динамики углеродного цикла. Авторами рассмотрены наиболее популярные модели, отражающие схемы и элементы цикла глобального круговорота углерода, закономерности динамики углерода в замкнутой экосистеме, концептуальные схемы и математиче-

ские модели, направленные на изучение динамики углерода. В качестве одного из результатов предложена математическая модель углеродного цикла в болотных экосистемах.

### Результаты и обсуждение

В работе [9] рассмотрены глобальные и региональные биосферные процессы на основе математического моделирования биосферы и ее частей, включая круговорот углерода в рамках модели глобальной системы атмосфера-растения-почва (АРП-1), представлены результаты математического моделирования. Модель АРП-1 (Рисунок 1) позволяет исследовать поведение системы атмосфера-растения-почва (АРП) при воздействии различных факторов, а также определить реакцию на данные воздействия [9].

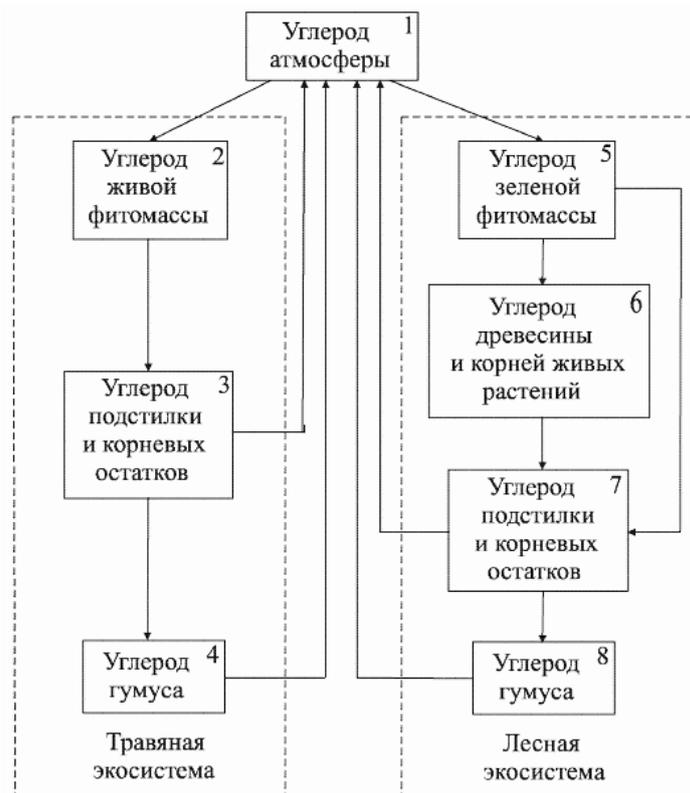


Рисунок 1 – Схема круговорота углерода в модели глобальной системы атмосфера-растения-почва АРП-1

Система АРП представлена в виде суммы двух подсистем: травяной экосистемы и лесной, разделенных на 8 различных уровней, описывающих функциональные зависимости потребление и выделения углерода. В соответствии с указанной схемой в работе описана математическая модель с использованием теории дифференциальных уравнений и методов системной динамики. В качестве неизвестных величин выступают функции, отражающие концентрацию или количество углерода на соответствующих уровнях. Результатами работы являются прогнозы возможных крупномасштабных изменений биосферы и климата, рассчитаны изменения концентрации двуокиси углерода, температуры атмосферы, параметров биоты суши и океана, показана мировая значимость территории России в ослаблении последствий глобальных антропогенных воздействий.

В настоящее время существует значительное количество моделей, посвящённых вопросам круговорота углерода в глобальном и региональном масштабах. Из наиболее известных можно выделить модель, описывающую глобальный круговорот углерода [10]. Авторами изучены вопросы глобальной экодинамики; описаны концептуальные диаграммы глобального круговорота углекислого газа; модели продукционных процессов в наземных биоценозах; выполнено

обобщение моделей газового обмена между атмосферой и океаном в рамках круговорота углекислого газа в системе атмосфера–океан, предложена методика параметризации биосферного баланса в виде единой биогеохимической системы, приведена глобальная модель функционирования системы «Природа–Общество», произведена оценка сценариев антропогенного воздействия. Одной из концептуальных диаграмм, отражающих компоненты глобального круговорота углекислого газа в работе [10] рассмотрена модель Богатырёва [11], которая параметризует переходные процессы в системе «тундра–тайга» и даёт возможность проследить ряд важных закономерностей. Поточковая схема углерода в системе представлена на рисунке 2.

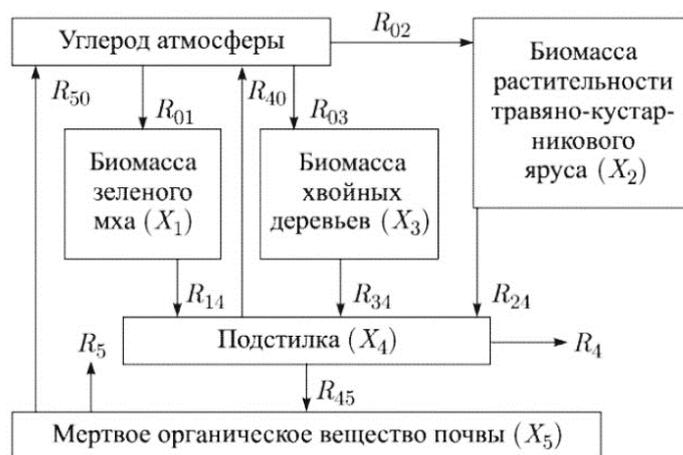


Рисунок 2 – Схема круговорота углерода системы «тундра-тайга» [11]

Фазовыми переменными модели являются: биомассы мха ( $X_1$ ), растительности травяно-кустарникового яруса ( $X_2$ ), хвойных деревьев ( $X_3$ ), подстилки ( $X_4$ ) и мёртвого органического вещества почвы ( $X_5$ ). Система балансовых уравнений модели переходных процессов на границе тайги и тундры имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_i}{dt} = R_{0i} - R_{i4}; \\ \frac{dX_4}{dt} = \sum_{i=1}^3 R_{i4} - R_{40} - R_{45} - R_4; \\ \frac{dX_5}{dt} = R_{45} - R_{50} - R_5. \end{cases}$$

где  $R_{ij}$  – функции элементов круговорота углерода системы;

$j$  – номер функции;

$i = 1, 2, \dots, n$  – множество параметров;

Данная модель может использоваться как самостоятельный блок глобальной модели, обеспечивая трансформацию пространственной структуры, уточняя локальные элементы модели водного баланса территории.

В работе [12] описываются свойства класса математических моделей экологических систем, строящихся по известным в математической экологии диаграммам «запасы–потоки». Алгоритм конструирования таких динамических моделей был предложен Моисеевым и Свиричевым [13]. Выясняются условия диссипативности систем обыкновенных дифференциальных уравнений, инвариантности конуса неотрицательных векторов фазового пространства и формы матрицы Якоби для равновесия. Приводятся примеры вычислительных экспериментов с моделями конкретной болотной экосистемы. На рисунке 3 представлена схема экологической модели, где все запасы измерены в  $г/м^2$ , а потоки в  $г/(м^2 \cdot год)$  сухого веса, т.е. в массовых, а не углеродных единицах.

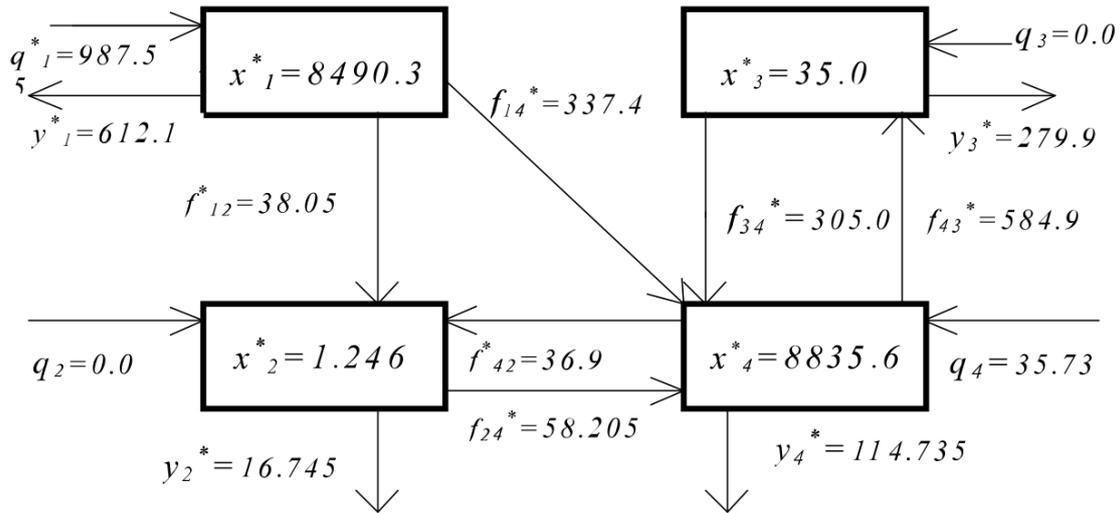


Диаграмма “запасы – потоки” для углеродного цикла в экосистеме переходного болота. Запасы:  $x_1$  – растения,  $x_2$  – животные,  $x_3$  – грибы и бактерии,  $x_4$  – отмершие части за исключением торфа (в единицах г/м<sup>2</sup>). Входные потоки:  $q_1$  – ассимиляция и фотосинтез,  $q_4$  – поступление с осадками и из других систем. Выходные потоки:  $y_1$  – дыхание растений и потребление фитофагами из других систем,  $y_2$  – дыхание животных,  $y_3$  – дыхание грибов и бактерий,  $y_4$  – вынос со стоком, торфообразование, абиотическое окисление (в единицах г/(м<sup>2</sup> год)).

Рисунок 3 – Схема экологической модели «запасы–потоки» [13].

В работе [14] рассматривается глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере при условии, что антропогенные выбросы углерода в атмосферу отсутствуют. Еще одна, рассматриваемая в работе минимальная модель, разработанная Барцевым и др. [15], записывается в виде системы из трёх уравнений. Первое уравнение описывает динамику углерода в биомассе живых растений, второе – динамику углерода органических остатков, и третье – закон сохранения массы углерода:

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

где  $f_{MaxGrowth}(T(A)) = T^d * (T_{MaxGrowth} - T) * \theta(T) * \theta(T_{MaxGrowth} - T)$  – зависимость прироста биомассы растений от среднегодовой глобальной температуры, где  $\theta$  – ступенчатая функция равная 1 при положительных значениях аргумента и нулю в остальных случаях;  
 $f_{MaxDecay}(T(A)) = T^b * (T_{MaxDecay} - T) * \theta(T) * \theta(T_{MaxDecay} - T)$  – зависимость почвенного дыхания от температуры;

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

$V(A) = \frac{A}{V_0 + A}$  – зависимость роста биомассы от содержания углерода атмосферы.

$V_x$  – масштабный множитель;

$A$  – содержание углерода в атмосфере;

$x$  – количество углерода в биомассе растений;

$y$  – количество углерода в отмершей биомассе;

$x_{max}$  – предельно достижимая плотность растительного покрова;

$T$  – средняя температура по поверхности.

Наряду с глобальными моделями динамики углерода, упомянутыми в данной работе, имеются публикации, учитывающие региональные особенности локальных болотных экосистем.

В работе [16] рассмотрена современная локальная модель углеродного цикла, описаны взаимодействия между многими критическими факторами почвы, гидрологии и растительности. Также описана авторская модель Wetland-DNDC динамики углерода и выбросов метана ( $\text{CH}_4$ ) в болотных экосистемах. Модель состоит из четырех взаимодействующих компонентов: гидрологических и тепловых условий, роста растений и динамики углерода в почве. Общая структура Wetland-DNDC взята из PnET-N-DNDC, процессно-ориентированной биогеохимической модели, которая имитирует динамику С и N в горных лесных экосистемах. Для Wetland-DNDC было разработано несколько новых алгоритмов для учёта уникальных особенностей экосистем болотных угодий, таких как динамика уровня грунтовых вод, рост мхов и травянистых растений, а также биогеохимических процессов в почве в анаэробных условиях. Модель была протестирована с учетом наблюдений на трёх участках болотных угодий в Северной Америке. Авторы работы утверждают, что адекватность разработанной модели подтверждается сравнением результатов модельных экспериментов с реальными измерениями динамики уровня грунтовых вод, температуры почвы, потоков  $\text{CH}_4$ , чистой продуктивности экосистемы (NEP) и годового баланса углерода. Анализ чувствительности показывает, что наиболее важными входными факторами для динамики углерода в болотных экосистемах являются температура воздуха, параметры оттока воды, исходное содержание углерода в почве и способность растений к фотосинтезу. Выбросы NEP и  $\text{CH}_4$  чувствительны ко многим тестируемым входным переменным. Интегрируя основные движущие силы климата, гидрологии, почвы и растительности модель Wetland-DNDC направлена на прогнозирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах.

В работе [17] описано 16 различных по структуре моделей углеродного цикла DALEC (Data Assimilation Linked Ecosystem Carbon). Модели откалиброваны на шести глобально распределённых участках земной поверхности с длинными временными рядами наблюдений и по 42 сценариям данных. Для каждой комбинации сценария данных и модели спрогнозирован чистый экосистемный обмен (NEE – Net Ecosystem Exchange) и индекс листовой площади (LAI – Leaf Area Index) для проверки на основе независимых местных данных. В результате моделирования выдвинуто предположение, что данные, характеризующие чистые потоки углерода, будут иметь ключевое значение для улучшения десятилетних прогнозов многомерных моделей земной биосферы.

В работе [2] предложена математическая модель углеродного цикла в болотных экосистемах, представленная в виде двух взаимодействующих пулов органического углерода:

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

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

Основными потоками в рассматриваемой схеме круговорота углерода являются:

- 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 мёртвого 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  $\text{NPP} = \text{GPP} - \text{AR}$ ;
- экосистемное дыхание (ER – ecosystem respiration) – сумма автотрофного и гетеротрофного дыхания;
- чистый экосистемный обмен (NEE) – разность валовой первичной продукции и экосистемного дыхания.

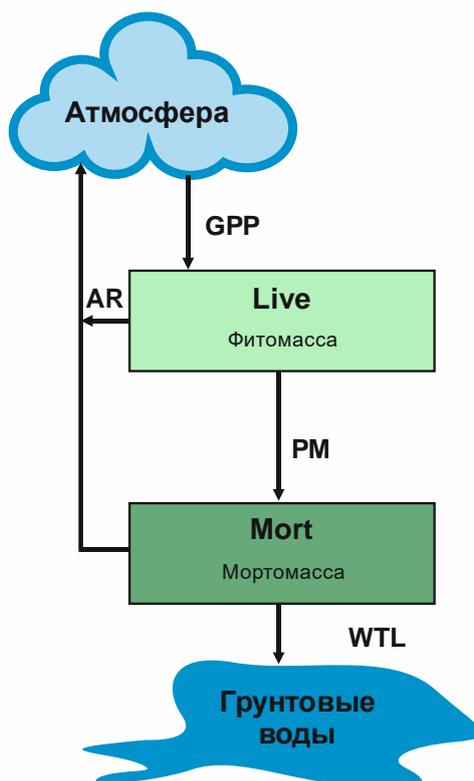


Рисунок 4 – Схема круговорота углерода в болотной экосистеме

Для представленной модели построена численная реализация в среде MATLAB с использованием метода Рунге-Кутты, проведён ряд экспериментов с различными значениями параметров модели. В частности, исследованы типы особых точек, построены интегральные кривые и фазовые портреты [2]. Полученные в ходе экспериментов численные результаты согласуются с теоретическими выкладками, представленными в [18] для модели Холлинга-Тэннера. Проведенные расчеты показали, что предложенная модель, учитывает ключевую особенность болотных экосистем, а именно – их незамкнутость: болотные экосистемы возвращают в атмосферу меньшее количество  $\text{CO}_2$ , чем поглощают в процессе фотосинтеза, аккумулируя в себе, таким образом, углерод.

### Заключение и выводы

В данной работе рассмотрены вопросы моделирования углеродного цикла в рамках глобальных климатических процессов. Отражены и проанализированы концептуальные схемы как глобального, так и локального круговорота углерода, приведены математические модели, рассмотрены наиболее популярные и современные модели на мировом уровне.

Полученные результаты анализа могут стать основой для дальнейшего исследования процессов в болотных экосистемах, включая Западную Сибирь. Описанные авторами принципы моделирования могут быть использованы для изучения таких важных элементов углеродного цикла, как, например, динамика концентрации  $\text{CO}_2$  в экосистемах болот. Предложенная в [2] модель может использоваться для исследования реальных экосистем.

### Литература

1. Тюремнов С. Н. Торфяные месторождения. – М.: Недра, 1976. – 487 с.
2. Дюкарев Е. А., Семенов С. П. Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах // Известия Алтайского государственного университета, 2022, № 4(126). – С. 104–109 DOI: 10.14258/izvasu(2022)4–16.

3. Кирпотин С. Н., Березин А. Е., Семенова Н. М. [и др.] Западная Сибирь как природный коллаيدر: климаторегулирующая функция болотных угодий // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Шестого Международного полевого симпозиума, Ханты-Мансийск, 28 июня 2021. – Томск: Издательство Томского университета – 2021. – С. 23–26.
4. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., & Peters, W. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press – 2013 – pp. 465–570. – <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
5. Rydin, Håkan, and John K. Jeglum. *The Biology of Peatlands*, 2nd ed. Oxford: Oxford University Press – 2013.
6. Page S. E., Baird A. J. Peatlands and Global Change: Response and Resilience. *Annual Review of Environment and Resources* 2016 41:1, 35–57.
7. Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nat Commun* 9, 1071 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.
8. Терентьева И. Е., Филиппов И. В., Сабреков А. Ф., Глаголев М. В., Курбатова Ю. А., Максюттов Ш. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // *Известия РАН. – Серия географическая*. – Т.84-6, 2020 – С. 920–930.
9. Тарко А. М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов // *Математическое моделирование*. – ISBN 5-9221-0591-4. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 232 с.
10. Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. – ISBN 5-9221-0528-0. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2004–336 с.
11. Тарко А. М., Богатырев Б. Г., Кириленко А. П., Коновалова Е. И., Писаренко Н. Ф., Удалкина М. В. Моделирование глобального цикла двуокиси углерода. – М., Вычислительный центр АН СССР, 1988, 43 с.
12. Завалишин Н. Н., Логофет Д. О. Моделирование экологических систем по заданной диаграмме «запасы-потоки» // *Математическое моделирование*, т. 9, номер 9. – 1997 – с. 3–17.
13. Моисеев Н. Н., Свирижев Ю. М. Концептуальная модель биосферы // *Вестник АН СССР, №2* – 1979 – с. 47–58.
14. 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. – Том 9, выпуск 1. – с. 82–88.
15. 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.
16. 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. 16(4), – pp. 9–17.
17. Famiglietti, C. A., Smallman, T. L., Levine, P. A., Flack-Prain, S., Quetin, G. R., Meyer, V., Parazoo, N. C., Stettz, S. G., Yang, Y., Bonal, D., Bloom, A. A., Williams, M., and Konings, A. G.: Optimal model complexity for terrestrial carbon cycle prediction, *Biogeosciences*, 18, 2727–2754, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2727-2021>. – 2021.
18. Эрроусмит Д. К. Обыкновенные дифференциальные уравнения : Качеств. теория с приложениями / Д. Эрроусмит, К. Плейс ; пер. с англ. Т. Д. Вентцель ; под ред. [и с предисл.] Н. Х. Розова. – Москва : Мир, 1986. – 243 с. : ил.; 22 см. – (Современ. математика : Ввод. курсы).