



ОПИСАНИЕ ЦИКЛА УГЛЕРОДА В ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТА

Пархоменко В. П. ORCID ID 0000-0002-9963-0496

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва, Российская Федерация,
e-mail: parhom@yandex.ru*

Разработана упрощенная трехмерная модель, которая дает возможность детально описать ключевые аспекты цикла углерода растительности. Основная цель моделирования – разработать универсальную модель потоков углерода на глобальной конечно-разностной сетке, которая будет учитывать продукционные процессы в лесных массивах и сезонные колебания климатических показателей с применением трехмерной климатической модели промежуточной степени сложности. В модель входят необходимые формулировки, отражающие зависимость растительного покрова и шероховатость подстилающей почвы от количества углерода в растениях, а также устанавливают корреляцию между массой углерода в почве и ее влагосодержанием. Модель воспроизводит глобальные характеристики цикла углерода в растительности: фотосинтез, дыхание растительности, дыхание листьев и почвы. Результаты расчетов модельных уравнений при изменении климатических условий проверяются путем сопоставления с пространственными наблюдениями, так как каждая точка пространственной сетки соотносится с различными комбинациями климатических факторов. Модель функционирует в комплексе с моделью климата, которая интегрирует трехмерную гидродинамическую модель атмосферы и термохалинную модель Мирового океана. В климатической модели определяются основные характеристики приземного слоя атмосферы (температура, влажность, осадки) и Мирового океана (температура, соленость, течения, морской лед). В ходе численных экспериментов было достигнуто состояние стационарного режима комплексной модели. Результаты показывают, что усредненные показатели климата Земли устанавливаются за 2000 лет.

Ключевые слова: трехмерная модель климата Земли, динамика природного углерода

DESCRIPTION OF THE CARBON CYCLE IN THE GLOBAL CLIMATE MODEL

Parkhomenko V. P. ORCID ID 0000-0002-9963-0496

*Federal Research Center “Computer Science and Control”
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,
e-mail: parhom@yandex.ru*

A simplified three-dimensional model has been developed that allows for a detailed description of key aspects of the vegetation carbon cycle. The main goal of the modeling is to develop a universal carbon flux model on a global finite-difference grid that takes into account the production processes in forests and the seasonal fluctuations of climate indicators using a three-dimensional climate model of intermediate complexity. The model includes new formulations that give the dependence of vegetation cover and of the underlying soil roughness on the plants carbon amount, as well as fact of the correlation between the carbon mass in the soil and its moisture content. The model reproduces global characteristics: photosynthesis, vegetation respiration, foliage respiration, and soil respiration. The response of the model equations to changing climatic conditions is verified by comparison with spatial observations, as each point on the spatial grid is associated with different combinations of climatic factors. The model is integrated with a climate model that integrates a three-dimensional hydrodynamic model of the atmosphere and a thermohaline model of the world ocean. The climate model determines the main characteristics of the surface layer of the atmosphere (temperature, humidity, precipitation) and the world ocean (temperature, salinity, currents, and sea ice). Numerical experiments have been made to achieve a stable state in the integrated model. During the numerical experiments, a stable state of the general model was achieved. The results show that the averaged Earth climate indicators are established in 2000 years.

Keywords: three-dimensional Earth climate model, natural carbon dynamics

Введение

В статье представлена глобальная модель, которая описывает изменения массы углерода в растительности и почве, уровень влагосодержания почвенного слоя, а также потоки энергии, влаги и углерода между поверхностью Земли и приземным воздухом. Ее можно отнести к моделям средней сложности, так как в ней не учитываются различные типы растительности. Применение

эффективного численного метода позволяет моделировать поведение системы на длительном интервале времени и выполнять масштабные расчеты в сочетании с трехмерной моделью климата средней подробности.

Модель объединяет в себе элементы простой блочной модели и упрощенной модели динамики углерода, интегрируя в едином механизме потоки и массу углерода. В отличие от традиционных подходов, где

отдельно рассматриваются формирование потоков углерода и описание его запасов, здесь эти процессы представлены в единой системе. По этой причине в модели отсутствует описание различных типов растительности, землепользования, пожаров, антропогенных выбросов, мерзлоты, азотного цикла.

Цель исследования – создать всеобъемлющую модель цикла углерода на конечно-разностной сетке 72 на 72 элементов одинаковой площади, которая будет отражать производственные процессы в лесных экосистемах с учетом годовых колебаний основных климатических показателей, анализ поведения модели при потенциальных будущих вариациях климатических параметров и оценку влияния лесных массивов на годовые колебания концентрации углерода в атмосфере.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования модель углеродного цикла [1] рассматривается совместно с моделью климата для атмосферы и Мирового океана на единой глобальной расчетной сетке, что предполагает, в отличие от [1], учет взаимного влияния модельных климатических характеристик на растительность и обратное влияние характеристик растительности на климат через альбедо и влажность суши и особенностей испарения влаги почвы [2]. По сравнению с работой [2] использована более точная расчетная сетка, увеличено пространственное разрешение и проведены новые численные эксперименты в режиме сезонного хода моделируемых характеристик климата и биоты. При описании основных течений в океане [2, 3] используются уравнения в аппроксимации Буссинеска, которые учитывают постоянность плотности воды в уравнениях для горизонтальных компонент импульса и в уравнении неразрывности, роль силы Кориолиса и турбулентную вязкость. Для вычисления распределения давления воды по глубине считается адекватным уравнение гидростатического равновесия. Указанные динамические зависимости дополняются уравнениями адвективного и вихревого переноса тепла и солей в океане. Модель океана дополняется уравнением состояния, связывающим плотность морской воды с ее температурой и соленостью. На верхней границе океана моделируется влияние ветра, а также учитываются потоки тепла и влаги из атмосферы. Модель океана подробно описана в [3].

При описании атмосферных процессов применяется энерго- и влагобалансовая модель [3]. В ней определяются температура и удельная влажность приземной атмосферы. Соответствующее уравнение отражает

баланс между поступающей и уходящей радиацией, обменом теплом между атмосферой и поверхностью земли (включая турбулентные потоки), выделением латентного тепла при осадках, а также упрощенное представление горизонтальных процессов переноса. Источники изменения удельной влажности в модели задаются такими факторами, как осадки, испарение и сублимация с поверхности земли.

Расчеты производятся в режиме среднесуточной инсоляции с учетом ее сезонных изменений. При данном допущении и однослойной почве принято приближение, что температура почвы достигает баланса быстрее, чем временной шаг для расчетов модели поверхности [3, 4]. В рамках модели принимаются во внимание следующие процессы и эффекты:

- влияние пространственного и сезонного распределения солнечной радиации и альбедо атмосферы и поверхности;
- наличие примеси и влаги в атмосфере;
- влияние теплового излучения, определяемого температурой подстилающей поверхности и атмосферы;
- влияние процессов испарения и выпадения осадков.

Влагосодержание почвы определяется как разница между количеством выпавших осадков и объемом испарившейся влаги.

В рассматриваемой модели углеродного цикла [1, 2] предусмотрено два основных резервуара накопления углерода на суше: растительность (C_v) и гумус (C_s). Предполагается, что растительность усваивает углерод из атмосферы посредством фотосинтеза (P) и выделяет в процессе дыхания растений (R_v). Растительность перемещает углерод в почву через опад (L), а почва возвращает его в атмосферу посредством почвенного дыхания (R_s).

Соответствующие балансные уравнения выглядят следующим образом:

$$\frac{dC_v}{dt} = P - R_v - L,$$

$$\frac{dC_s}{dt} = L - R_s.$$

Нетто-фотосинтез P задается соотношением [2, 5]:

$$P = kf_1(CO_2)f_2(W_s)f_3(T_a)f_v,$$

которое представляет собой произведение четырех функциональных зависимостей. Они фиксируют влияние следующих факторов: концентрации CO_2 ($f_1(CO_2)$), водного потенциала ($f_2(W_s)$), температуры атмосферы ($f_3(T_a)$) и фотосинтетической активности

биомассы (f_v). Константа k обозначает базовую скорость нетто-фотосинтеза листы.

Зависимость нетто-фотосинтеза листы от температуры основывается на максимальной скорости карбоксилирования Рубиско, с дополнительным ограничением при отрицательных температурах [5]. Фотосинтетическая активность растений способна адаптироваться к доминирующим температурным условиям [6, 7]. В особых бореальных лесах она может достигать оптимального уровня при относительно низких температурах и в зависимости фотосинтеза от уровня влагосодержания в модельных уравнениях. Для определения фотосинтетической активности в модели используются две температурные функции с двумя пиками. Они позволяют учесть особенности реакции растительности полярных и средних широт. Два пика были предложены на основе рассмотрения сведений о массе углерода в растительности [7] в зависимости от географической широты [8]. Альbedo подстилающей поверхности зависит от ее типа и особенностей растительности и массы углерода в почве [9].

Предполагается, что осадки переходят в твердое состояние, если температура атмосферы и почвы опускается ниже -5°C [2]. Снежный покров сохраняется до тех пор, пока температура не поднимется выше этого значения. В настоящей работе существенное внимание уделяется влиянию альbedo снежного покрова, вычисляемому в климатическом блоке комплексной модели, при этом более сложные термодинамические связи, включая фазовые переходы, игнорируются. В процессе калибровки модели, описывающей процессы в наземной растительности, были использованы данные, соответствующие доиндустриальной эпохе, когда концентрация углекислого газа в атмосфере составляла 278 ppm [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что параметры углеродного цикла в разработанной модели согласуются с уровнем CO_2 в атмосфере доиндустриального периода – 278 ppm. При таких условиях математические выражения, описывающие циркуляцию углерода, приближаются к линейным зависимостям, что позволяет адаптировать модель к различным значениям посредством нескольких расчетных симуляций. Для настройки модели были взяты данные наблюдений [10], в частности значения 120 ГтС в год для нетто-фотосинтеза и 60 ГтС в год для остальных потоков. Путем корректировки параметров модели и последующего применения итеративного

подхода удалось устранить незначительные отклонения от линейности. Проведенное моделирование позволило определить глобальные параметры:

- фотосинтез – 119,2 ГтС в год;
- дыхание растительности – 57,9 ГтС в год;
- дыхание листы и почвы – 61,3 ГтС в год.

Глобальные запасы углерода в растительности составляют 437 ГтС, а в почве – 1317 ГтС. Реакция модельных уравнений на изменяющиеся климатические условия проверяется путем сопоставления с пространственными наблюдениями, так как каждая точка пространственной сетки соотносится с различными комбинациями климатических факторов, что позволяет оценить адекватность модели.

Анализ показал, что ключевые показатели модели достигают стабильного состояния в течение 2000 лет модельного периода. Это фиксируется эволюцией среднегодовых характеристик климата и глобальными запасами углерода в почве и растительности (рис. 1) [11, 12]. При этом скорость изменения указанных показателей не превышает 5 % при продолжении расчетов.

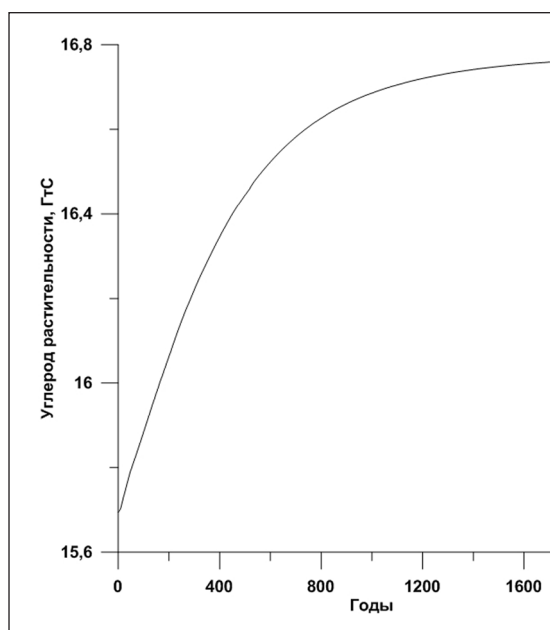


Рис. 1. Среднегодовое содержание углерода в растительности за 2000 лет
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Расчеты показали, что наибольший запас углерода в растительности наблюдается на территории Американского материка в районе экватора, распространяясь

до 50 градусов широты (рис. 2). Выявлены два пика растительности, которые соответствуют расположению тропических и бореальных лесов, что коррелирует с эмпирическими данными [13].

Вероятно, неидеальное описание растительности связано с тем, что расчет модели ведется от «нулевой точки». Для получения более реалистичного распределения расти-

тельности необходимо проводить вычисления с использованием реальных исходных условий [14, 15]. На основе модельного описания динамики углерода рассчитываются изменения альбедо земной поверхности, уровня шероховатости и температуры верхнего слоя подстилающей поверхности, глубины снежного покрова и влажности почвы (рис. 3–5).

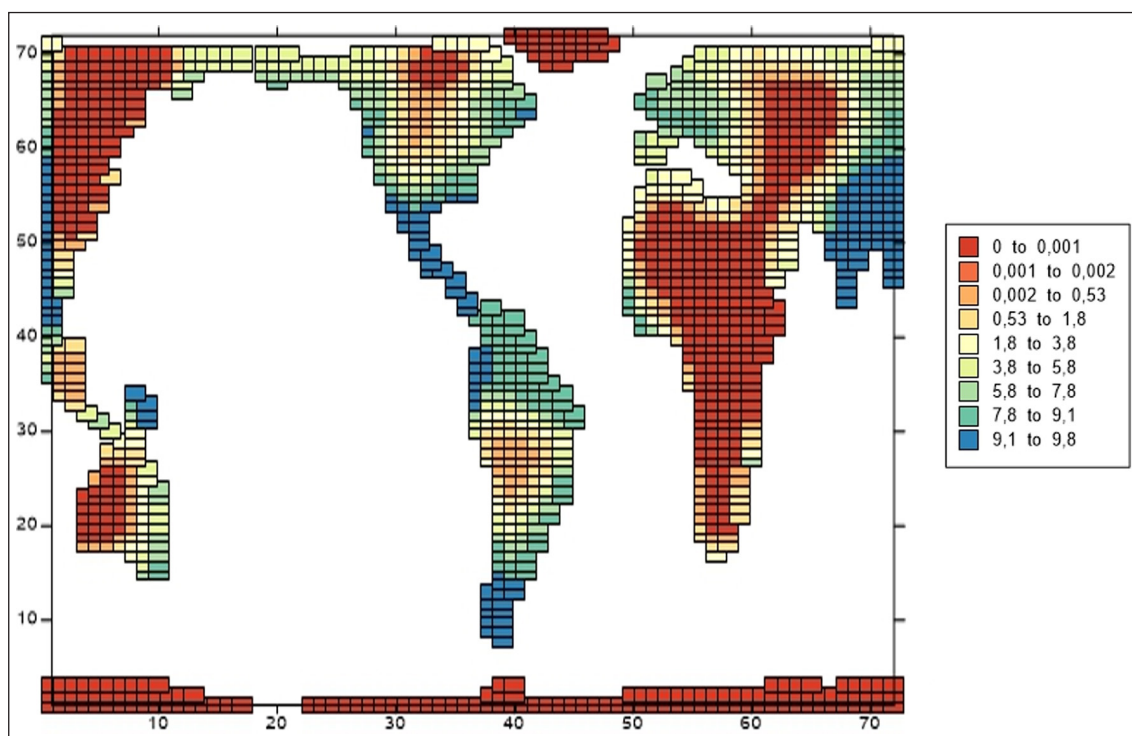


Рис. 2. Среднегодовое распределение углеродных запасов в растительном покрове
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

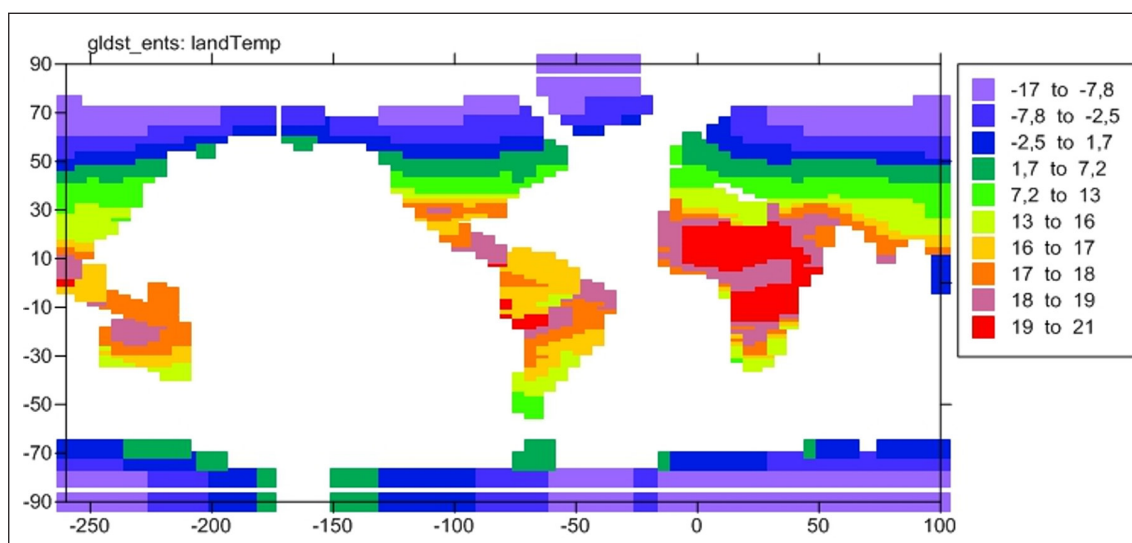


Рис. 3. Среднегодовая температура верхнего слоя суши
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

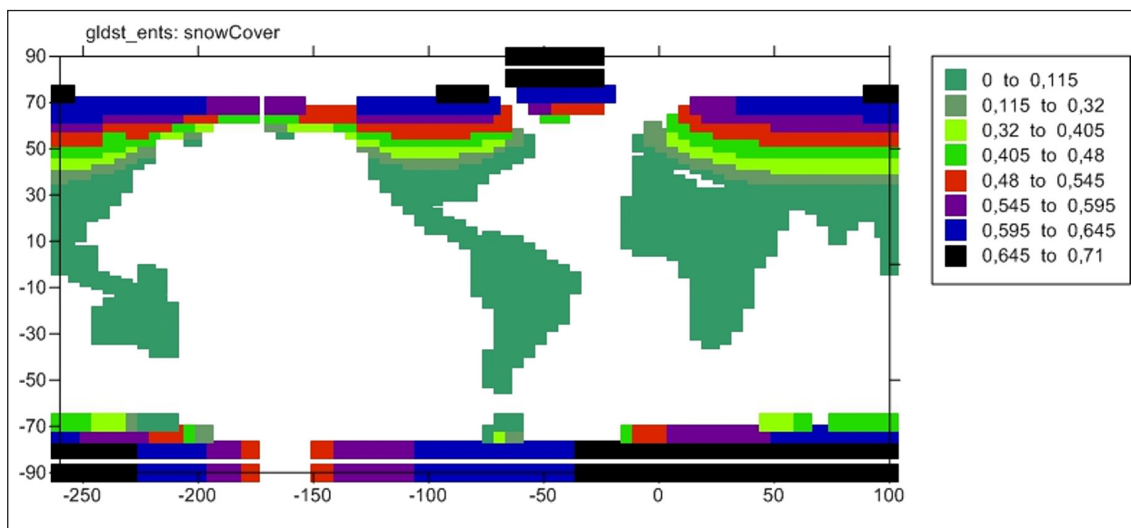


Рис. 4. Среднегодовая толщина снежного покрова

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

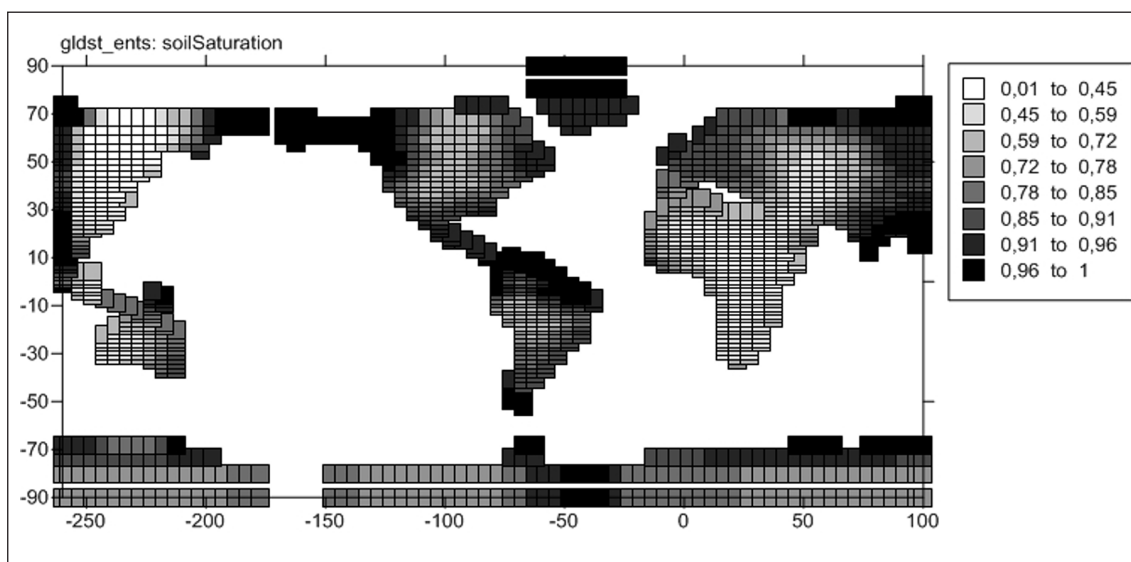


Рис. 5. Среднегодовая относительная влажность почвы

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Заклучение

С целью расширения возможностей получения новых результатов моделирования глобальной климатической системы, предложено использование климатической модели средней сложности, которая включает блок энерго- и влагобалансовой модели атмосферы и блок трехмерной термохалинной модели Мирового океана, совместно с разработанной глобальной моделью биогеохимического цикла углерода растительности. Модель построена на глобальной расчетной сетке с разрешением 72x72 ячейки одинаковой площади и учитывает про-

дукционные процессы в лесных экосистемах, а также сезонные изменения глобальных климатических показателей. В модели отсутствует описание различных типов растительности, землепользования, пожаров, антропогенных выбросов, мерзлоты, азотного цикла, что связано с ее применением в качестве отдельного блока в модели глобального климата.

В ходе численных экспериментов было достигнуто состояние устойчивого равновесия объединенной модели. Результаты свидетельствуют о том, что усредненные показатели глобального климата приходят в это

состояние примерно за 2000 лет. В данной конфигурации модель достигает численно устойчивого стационарного режима.

Представлены временные и пространственные характеристики климатических параметров и показателей динамики углерода в наземной растительности. Установлено существование двух максимумов концентрации растительности, которые отвечают расположению тропических и бореальных лесов, что согласуется с данными полевых наблюдений.

Список литературы

1. Williamson M. S., Lenton T. M., Shepherd J. G., Edwards N. R. An efficient numerical terrestrial scheme (ENTS) for Earth system modelling // *Ecological Modelling*. 2006. № 198 (3–4). P. 362–374. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.05.027.
2. Пархоменко В. П. Глобальная климатическая модель с учетом биогеохимического углеродного цикла растительности суши // *Математическое моделирование и численные методы*. 2021. № 2. С. 38–53. DOI: 10.18698/2309-3684-2021-2-3853.
3. Пархоменко В. П. Организация численных экспериментов на модели общей циркуляции атмосферы и глобальной модели океана // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2021. № 61 (10). С. 1693–1703. DOI: 10.31857/S0044466921100148.
4. Parkhomenko V. P. A model study of the global climate sensitivity to changes in solar radiation // *Journal of Physics. Conference Series*. 2025. № 3027 (1). 012058. P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/3027/1/012058.
5. Iñiguez C., Galmés J., Gordillo F. J. L. Rubisco carboxylation kinetics and inorganic carbon utilization in polar versus cold-temperate seaweeds // *Journal of Experimental Botany*. 2019. № 70 (4). P. 1283–1297. DOI: 10.1093/jxb/ery443.
6. Lenton T. M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model // *Tellus*. B: Chemical and Physical Meteorology. 2000. Vol. 52 (5). P. 1159–1188. DOI: 10.1034/j.1600-0889.2000.01104.x.
7. Adams B., White A., Lenton T. M. An analysis of some diverse approaches to modelling net primary productivity // *Ecological Modelling*. 2004. № 177. P. 353–391. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.03.014.
8. Cox P. M., Huntingford C., Harding R. J. A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme // *Journal of Hydrology*. 1998. № 212–213. P. 79–94. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00203-0.
9. Пархоменко В. П. Применение квазислучайного подхода и ансамблевых вычислений для определения оптимальных наборов значений параметров климатической модели // *Информатика и ее применения*. 2017. Т. 11. № 2. С. 65–74. DOI: 10.14357/19922264170208.
10. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)*. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
11. Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // *Почвоведение*. 2020. № 3. С. 340–350. DOI: 10.31857/S0032180X20030028.
12. Ainsworth E. A., Lemonnier P., Wedow J. M. The influence of rising tropospheric carbon dioxide and ozone on plant productivity // *Plant Biology*. 2020. Vol. 22. Is. S1 P. 5–11. DOI: 10.1111/plb.12973.
13. Frelich L. E. Boreal and Taiga Biome. In: Goldstein M.I., DellaSala D.A., editors. *Encyclopedia of the World's Biomes*. Elsevier. 2020. P. 103–115. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11926-8. ISBN 9780128160961.
14. Curtis P. G., Slay C. M., Harris N. L., Tyukavina A., Hansen M. C. Classifying drivers of global forest loss // *Science*. 2018. № 361 (6407). P. 1108–1111. DOI: 10.1126/science.aau3445.
15. Jonas M., Bun R., Ryzha I., Zebrowski P. Quantifying memory and persistence in the atmosphere–land and ocean carbon system // *Earth System Dynamics*. 2022. Vol. 13. Is. 1. P. 439–455. DOI: 10.5194/esd-13-439-2022.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.