ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.4:630:551.5:519.6
DOI: 10.46698/VNC.2026.74.83.001

Оригинальная статья

Межгодовая и сезонная изменчивость углеродного обмена широколиственного леса Северного Кавказа по результатам биогеохимического моделирования

Е.В. Фокеев[1], О.Э. Суховеева[2], А.В. Ольчев[1,3], И.А. Керимов[3]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1;

[2] Институт географии РАН, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29;

[3] Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100, e-mail: ibragim_kerimov@mail.ru

Статья поступила: 23.02.2026, доработана: 14.09.2026, принята к публикации: 11.09.2026

Резюме: Актуальность работы. Леса Северного Кавказа обладают значительным потенциалом поглощения диоксида углерода (CO_2), однако их углеродный баланс и устойчивость к климатическим аномалиям, особенно в горных районах с высокой ландшафтной неоднородностью, изучены недостаточно. **Целью исследования** является оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 и определение влияния температурного режима и условий увлажнения на углеродный баланс широколиственного леса предгорной зоны Северного Кавказа. **Методы исследования.** Расчеты выполнены с использованием биогеохимической модели Forest-DNDC для эталонного участка «Рошни-Чу» карбонового полигона Чеченской Республики за 2005–2025 гг. В качестве входных параметров использованы данные региональных ландшафтных исследований и реанализа ERA5. **Результаты.** Выявлена высокая межгодовая и сезонная изменчивость потоков CO_2 и чувствительность углеродного баланса к температурному и гидрологическому режимам. В благоприятные по увлажнению годы экосистема поглощала до 2000–2500 кг С/га в год, тогда как в жаркие и засушливые периоды становилась источником CO_2 с эмиссией до 200–400 кг С/га. Межгодовая изменчивость нетто экосистемного обмена (NEE) преимущественно определялась изменениями валовой первичной продукции (GPP) и гетеротрофного дыхания почвы (Rh), тогда как автотрофное дыхание (Ra) характеризовалось большей инерционностью. В условиях летней засушливости снижение GPP опережало уменьшение экосистемного дыхания (RE), что приводило к ослаблению поглощения CO_2. Полученные результаты указывают на уязвимость углеродного баланса широколиственных лесов Северного Кавказа к дальнейшему потеплению и увеличению повторяемости климатических аномалий.

Ключевые слова: Forest-DNDC, углеродный баланс, потоки диоксида углерода, температурно-влажностные условия, климатические изменения.

Благодарности: *Работа выполнена в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова, FZNU-2024-0002.*

Для цитирования: Фокеев Е.В., Суховеева О.Э., Ольчев А.В., Керимов И.А. Межгодовая и сезонная изменчивость углеродного обмена широколиственного леса Северного Кавказа по результатам биогеохимического моделирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): 237–251. DOI: 10.46698/VNC.2026.74.83.001

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2026.74.83.001

Original paper

Interannual and seasonal variability in the carbon cycle of a broadleaf forest in the North Caucasus, based on biogeochemical modeling results

E.V. Fokeev[1], O.E. Sukhoveeva[2], A.V. Olchev[1,3], I.A. Kerimov[3]

[1] Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation;

[2] Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetniy Lane, Moscow 119017, Russian Federation;

[3] Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation, e-mail: ibragim_kerimov@mail.ru

Received: 23.02.2026, revised: 14.09.2026, accepted: 11.09.2026

Abstract: Relevance. The forests of the North Caucasus have significant potential for carbon dioxide (CO_2) absorption. However, their carbon balance and resilience to climatic anomalies, especially in mountainous areas with high landscape heterogeneity, have not yet been thoroughly investigated. This study **aims** to evaluate the spatiotemporal variability of CO_2 fluxes and determine how temperature and moisture conditions influence the carbon balance of a broadleaf forest in the North Caucasus foothills. **Methods.** Calculations were performed using the Forest-DNDC biogeochemical model for the "Roshni-Chu" reference plot in the Chechen Republic's carbon supersite from 2005 to 2025. Data from regional landscape studies and the ERA5 reanalysis were used as input parameters. **Results.** The study revealed high interannual and seasonal variability in CO_2 fluxes, as well as the sensitivity of the carbon balance to temperature and hydrological conditions. In years with favorable moisture conditions, the ecosystem absorbed 2000–2500 kg C/ha/year. During hot and dry periods, however, it released CO_2 into the atmosphere at rates of up to 200–400 kg C/ha/year. Interannual variability in net ecosystem exchange (NEE) was primarily determined by changes in gross primary production (GPP) and soil heterotrophic respiration (R_h). Autotrophic respiration (R_a), however, was characterized by greater inertia. Under summer drought conditions, the decline in GPP preceded the decrease in ecosystem respiration (RE), leading to a reduction in CO_2 uptake. These results suggest that the carbon balance of broadleaf forests in the North Caucasus is highly sensitive to further warming and an increase in the frequency of climate anomalies.

Keywords: Forest-DNDC, carbon balance, carbon dioxide fluxes, temperature and moisture conditions, climate change.

Acknowledgements: *The work was supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2024-0002).*

For citation: Fokeev E.V., Sukhoveeva O.E., Olchev A.V., Kerimov I.A. Interannual and seasonal variability in the carbon cycle of a broadleaf forest in the North Caucasus, based on biogeochemical modeling results. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): 237–251. DOI: 10.46698/VNC.2026.74.83.001

Введение

Лесные экосистемы Северного Кавказа представляют собой уникальный природный комплекс, характеризующийся высоким биоразнообразием, сложной пространственной структурой и ярко выраженной ландшафтной неоднородностью. В условиях современных климатических изменений роль лесов существенно возрастает с учетом их высокого потенциала поглощения антропогенных выбросов диоксида углерода (CO_2) и других парниковых газов [Olchev, 2025]. По современным оценкам леса ежегодно поглощают около 3,5 ± 0,4 ПгС, что составляет порядка 30% суммарных антропогенных выбросов CO_2 [Friedlingstein et al., 2025; Pan et al., 2024]. Вместе с тем выраженная пространственная неоднородность лесных экосистем и существенные различия в их поглотительной способности, включая слабо изученные горные регионы, остаются одним из основных источников неопределенности при оценке региональных потоков парниковых газов.

Современные оценки динамики приземной температуры для значительной части Северного Кавказа указывают на их существенное превышение среднемировых значений температурных изменений [Serykh et al., 2025]. Подобные климатические сдвиги способны приводить к заметным изменениям структуры углеродного баланса лесных экосистем, включая соотношение процессов фотосинтеза растений, автотрофного и гетеротрофного дыхания. Такие изменения могут существенно варьировать даже в пределах относительно небольших территорий, что требует проведения комплексных исследований, объединяющих полевые наблюдения и компьютерное моделирование. Решение подобных задач является одним из ключевых направлений функционирования созданной в Российской Федерации сети карбоновых полигонов [Карбоновые полигоны…, 2025].

Именно для решения данного круга задач предгорья Большого Кавказа на протяжении последних лет являются объектом интенсивных экспериментальных и модельных исследований [Мухартова и др., 2023; Керимов и др., 2024]. Однако, несмотря на значительный объем накопленных экспериментальных данных, в условиях сложного рельефа, высокой мозаичности растительного покрова и ограниченных возможностей применения традиционных измерительных методов для потоков парниковых газов, задача комплексной оценки углеродного баланса горных лесов остается достаточно актуальной. Ограниченная пространственная репрезентативность наземных наблюдений существенно затрудняет экстраполяцию полученных локальных данных на региональный уровень.

В этих условиях наиболее перспективным подходом к решению данной задачи является интеграция результатов полевых наблюдений, данных дистанционного зондирования и численного моделирования, позволяющая совместить детальность локальных измерений с пространственным охватом дистанционного зондирования и модельных расчетов [Bastos et al., 2020]. Такой подход обеспечивает возможность количественной оценки потоков парниковых газов в различных временных и пространственных масштабах, включая районы с ограниченной сетью регулярных мониторинговых наблюдений, что особенно важно для горных регионов с высокой ландшафтной неоднородностью [Olchev, 2025].

Для описания углеродного баланса и потоков парниковых газов в настоящее время разработан широкий спектр математических моделей, различающихся по уровню детализации биофизических процессов в растительности и почве, временной динамике и пространственному охвату. Глобальные биогеохимические модели, такие как Biome-BGC, ORCHIDEE и LPJ [White et al., 2000; Sitch et al., 2003; Krinner et al., 2005], эффективно применяются для оценки континентальных и глобальных потоков парниковых газов, однако их использование в горных ландшафтах требует тщательной региональной калибровки и верификации [Thum et al., 2019; Adams et al., 2017]. В свою очередь, процесс-ориентированные модели экосистемного уровня, включая DNDC и Forest-DNDC [Li et al., 1992, 2000], позволяют детально описывать временную и про-

странственную изменчивость углеродного баланса на локальном уровне и учитывать сложное взаимодействие климатических факторов, растительности и почв, включая отклик углеродного обмена на экстремальные погодные условия. Это делает данный тип моделей особенно перспективным для исследований в регионах со сложными природными условиями и высоким биоразнообразием, характерными для горных территорий [Gilhespy et al., 2014], а также для выполнения регионально ориентированных оценок чувствительности углеродного баланса к климатическим аномалиям.

В этом контексте актуальность настоящего исследования определяется необходимостью количественной оценки углеродного баланса широколиственных лесов Северного Кавказа, включая экосистемы с участием дикорастущих плодовых видов, параметры углеродного обмена которых до настоящего времени изучены крайне недостаточно. Особое значение имеет анализ реакции таких лесов на климатические аномалии, включая периоды засух, аномальной жары, интенсивных и продолжительных осадков [Reichstein et al., 2013], а также оценка их потенциального вклада в достижение целей национальной климатической политики Российской Федерации [Карбоновые полигоны…, 2025].

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 в широколиственном лесу на основе численного моделирования, а также оценка влияния аномалий температуры и осадков на компоненты углеродного баланса лесных экосистем Северного Кавказа. Научная новизна исследования заключается в проведении модельного исследования для большого временного интервала (2005–2025 гг.) с целью анализа реакции углеродного обмена широколиственных лесов, включая сообщества с участием дикорастущих плодовых пород, на экстремальные климатические условия (температура, осадки) различной направленности. Полученные результаты могут служить основой для оценки секвестрационного потенциала региональных лесов и разработки рекомендаций по их рациональному использованию в условиях меняющегося климата.

Методы и материалы

Моделирование углеродного обмена лесной экосистемы

Для оценки годовых и сезонных изменений потоков CO_2 в исследовании использована динамическая биогеохимическая модель Forest-DNDC (Forest DeNitrification-DeComposition), специально разработанная для моделирования углеродного обмена в лесных экосистемах. Эта модель относится к классу процесс-ориентированных и основана на описании фундаментальных биофизических и биогеохимических процессов, регулирующих процессы углеродного обмена между растительностью, почвой и атмосферой [Li et al., 2000]. Выбор данной модели обусловлен ее высокой эффективностью в воспроизведении углеродного цикла лесных экосистем в условиях умеренного климата и возможностью детального описания влияния климатических факторов на процессы фотосинтеза, дыхания и разложения органического вещества [Gilhespy et al., 2014].

Модель Forest-DNDC построена по модульному принципу (рис. 1) и включает четыре тесно взаимосвязанных блока: климатический, гидрологический, лесной растительности и почвенно-биогеохимический. Климатический блок использует ежедневные данные о температуре воздуха и количестве осадков для расчета температуры почвы и ее влагосодержания, которые определяют интенсивность фотосинтеза и дыхания растений, а также микробного разложения органического вещества в почве. Гидрологический блок описывает движение и перераспределение воды в экосистеме и определяет процессы испарения и водный режим почвы через решение уравнения водного баланса, включающего инфильтрацию, капиллярный подъем влаги и испарение. Лесная или фенологическая подмодель описывает рост и развитие растительных сообществ, их сезонную динамику и круговорот углерода, включая фенологические процессы, фотосинтез и дыхание растений. Почвенно-биогеохимический блок отвечает за процессы трансформации органи-

ческого вещества, распределение углерода между различными пулами, азотный цикл и оценку эмиссии парниковых газов с поверхности почвы. Углеродный баланс экосистемы, включая нетто-экосистемный обмен (NEE), рассчитывается с учетом всей совокупности атмосферных, почвенных факторов и свойств растительного покрова.

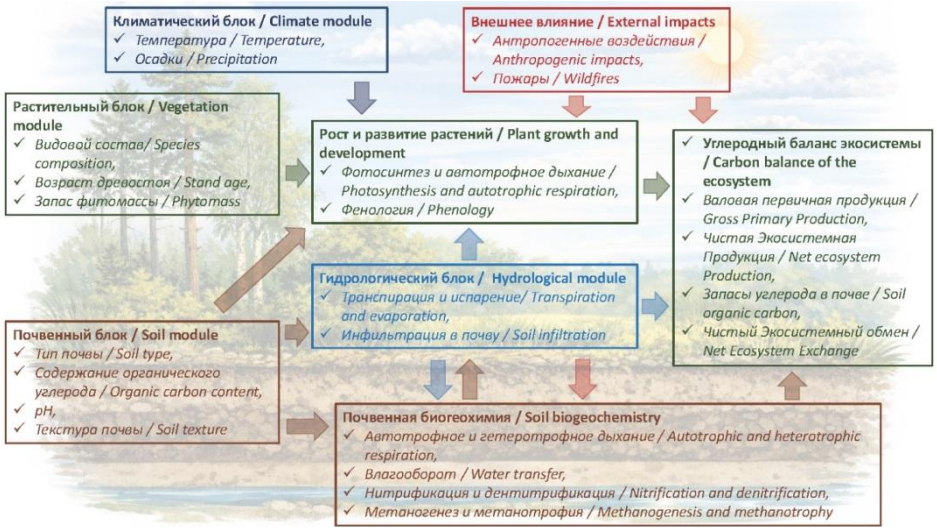

Рис. 1. Схема модели Forest-DNDC [Li et al., 2000] /
Fig. 1. Schematic diagram of the Forest-DNDC model [Li et al., 2000]

Район исследований и входные параметры

Объектом исследования послужил экспериментальный участок «Рошни-Чу» Карбонового полигона Чеченской Республики, расположенный в предгорной зоне Северного Кавказа (43.05° с.ш., 45.43° в.д.) (рис. 2). Климат района исследований умеренно континентальный с четко выраженными сезонами. Средняя температура января составляет +2.0 ± 1.0 °C, средняя температура июля – +22.5 ± 1.5 °C; годовое количество осадков – 400 ± 30-50 мм [Керимов и др., 2021].

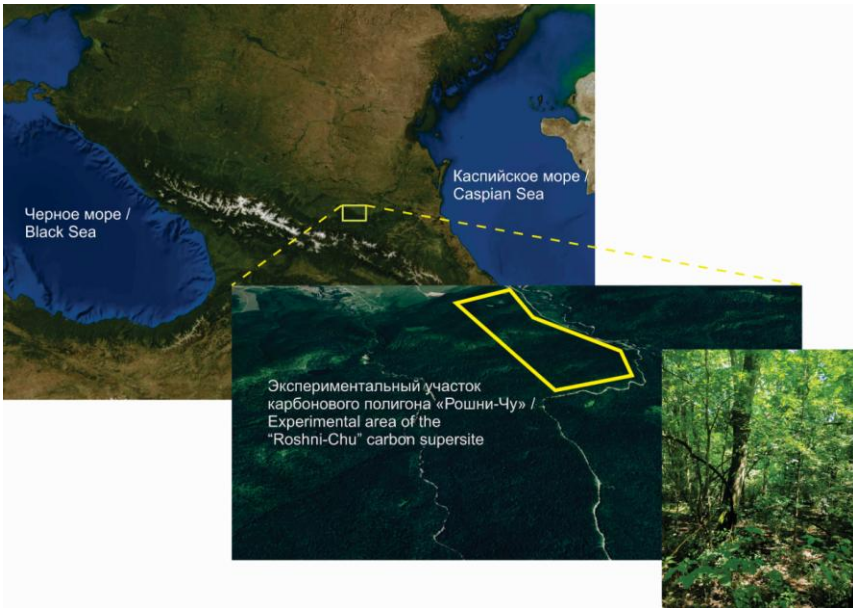

Рис. 2. Географическое положение модельного участка Рошни-Чу и фотография древесного полога. Карта построена с использованием спутниковых данных на платформе Google Earth /
Fig. 2. Geographic location of the Roshni-Chu experimental site. The map was created using satellite imagery from the Google Earth platform

Исследуемая территория имеет площадь 243 га и представляет собой переходный тип от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-луговокустарниковому подтипу. Территория характеризуется среднерасчлененным рельефом с перепадом высот от 418 до 550 м над уровнем моря. Геологическое строение представлено преимущественно песчано-глинистыми, сланцевыми и известняковыми отложениями палеоген-неогенового возраста.

Высокая пространственная неоднородность рельефа и почвенного покрова может обусловливать различия во влагообеспеченности, радиационном режиме и интенсивности почвенных процессов на отдельных участках территории, однако в настоящем исследовании эти различия не рассматривались как самостоятельные факторы межгодовой изменчивости NEE.

Для модельных расчетов потоков CO_2 между исследуемым лесным участком и атмосферой был выбран период 2005–2025 гг. Расчеты проводились с суточным шагом по времени.

Климатические данные включали суточные значения максимальной и минимальной температуры воздуха, а также количества осадков из данных реанализа ERA-5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5).

Для интегральной характеристики температурно-влажностных условий использовался гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). ГТК рассчитывался как отношение суммы атмосферных осадков к сумме положительных температур воздуха за период со среднесуточной температурой выше 10 °C, умноженной на коэффициент 0,1. В работе применялись как годовые, так и среднемесячные значения ГТК. Годовые оценки использовались для анализа межгодовой изменчивости нетто-экосистемного обмена CO_2, тогда как месячные значения ГТК применялись при интерпретации сезонной динамики потоков CO_2 и выявлении периодов температурного и водного стресса на протяжении вегетационного периода. Использование ГТК позволило интегрально оценить совместное влияние теплового и водного режимов на эмиссию и поглощение CO_2 в экосистеме.

Характеристики почвенного покрова были получены на основе полевых исследований и литературных данных. Для территории участка карбонового полигона «Рошни-Чу» характерны кислые почвы с pH 3,9–4,4 и низким содержанием гумуса (от 0,6 до 4,8%). Запас органического углерода в почве (SOC) для подстилки и нижележащих слоев (0–50 см) был принят равным 80000 кг C/га (по данным Научно-исследовательского центра «Цифровая почвенно-агроэкологическая карта России», https://soil-db.ru/). Гранулометрический состав почв характеризуется низким содержанием глинистой фракции (до 10%), плотность почвы варьирует в пределах 0,7–0,9 г/см^3.

Структура и состав древостоя были определены на основе данных дистанционного зондирования с БПЛА и лесотаксационных исследований. Преобладающим видом в древостое является дуб кавказский, на который приходится около 60% общей биомассы. Широко распространен бук восточный, занимающий около 25% площади. Суммарная биомасса древесины для проведения модельных расчетов была принята равной 120 000 кгС/га; распределение биомассы по компонентам (стволы, ветви, листья, корни) выполнено в соответствии с аллометрическими соотношениями для широколиственных пород деревьев, принятыми в модели Forest-DNDC [Zhang et al., 2017]. Почвенный покров участка отличается сильной пространственной неоднородностью и представлен преимущественно горнолесными бурыми почвами, местами с признаками оподзоливания [Керимов и др., 2021].

Результаты

Годовая динамика потоков CO_2

Смоделированная годовая динамика NEE для широколиственного леса на участке «Рошни-Чу» (2005–2025 гг.) демонстрирует выраженную межгодовую изменчивость (рис. 3), связанную с различиями температурно-влажностных условий.

В большую часть исследуемого периода экосистема в модельных расчетах функционировала как поглотитель CO_2 (преобладание отрицательных значений NEE), при этом средние годовые значения NEE находились преимущественно в диапазоне от −500 до −1000 кг C/(га год). Максимальное поглощение достигало около −2500 и −2000 кг C/(га год) в 2009 и 2016 гг. соответственно, когда валовая первичная продукция (GPP) превышала экосистемное дыхание (RE).

В 2022 году NEE достиг положительных значений (до +400 кг C/(га год)), что соответствует превышению модельных значений RE над GPP. Таким образом, в этом году годовой углеродный баланс сместился от нетто-поглощения к чистой эмиссии CO_2.

После 2017 г. в модельном ряду увеличилась повторяемость лет с ослабленным поглощением CO_2, а в отдельные годы NEE принимал положительные значения. Эта особенность совпадает с повышением температурного фона и изменениями условий увлажнения, наблюдаемыми в рассматриваемый период.

Сопоставление межгодовой динамики NEE с метеорологическими параметрами (рис. 3) показывает, что годы максимального поглощения CO_2, включая 2009 и 2016 гг., характеризовались более благоприятными условиями увлажнения и повышенными значениями ГТК. Напротив, в годы с повышенным температурным фоном и ограниченной влагообеспеченностью поглощение CO_2 ослаблялось, а в отдельных случаях годовые значения NEE становились положительными.

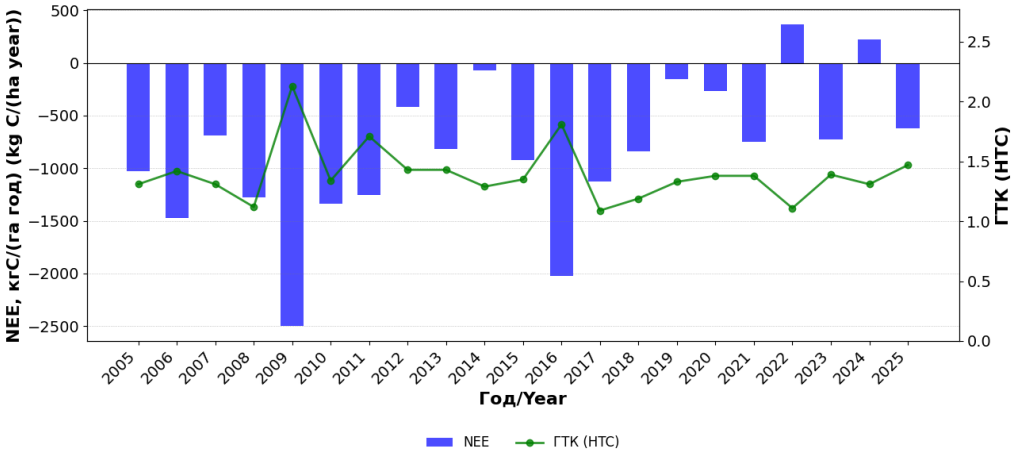

Рис. 3. Смоделированные годовые потоки нетто-экосистемного обмена (NEE) и гидротермического коэффициента (ГТК) за период с 2005 по 2025 гг. для рассматриваемого лесного участка /

Figure 3. Simulated annual net ecosystem exchange (NEE) and Selyaninov's hydrothermal coefficient (HTC) for the period 2005–2025 at the studied forest site

После 2017 г. на фоне повышения температуры и ограниченной влагообеспеченности снижение GPP сопровождалось изменениями компонентов дыхания. В результате годовой баланс CO_2 либо характеризовался слабым поглощением, либо смещался в область положительных значений NEE.

Для количественной оценки связи межгодовой изменчивости NEE с основными климатическими факторами был выполнен двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 1). В качестве факторов использовались среднегодовая температура воздуха и

годовая сумма атмосферных осадков за 2005–2025 гг.; зависимой переменной являлось годовое значение NEE. Оба фактора оказывали статистически значимое влияние на межгодовую изменчивость NEE ($p < 0,05$), тогда как их взаимодействие не было значимым ($p > 0,05$). Доля объясненной дисперсии, связанная с осадками, составила 23,2%, с температурой – 18,8%, тогда как 53,5% изменчивости приходилось на факторы, не включенные в анализ.

Таблица 1 / Table 1

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния температуры воздуха и количества осадков на межгодовую изменчивость NEE (2005–2025 гг.) / Results of a two-way analysis of variance (ANOVA) assessing the effects of air temperature and precipitation on the interannual variability of NEE (2005–2025)

Источник изменчивости / Source of variation	Степени свободы / df	Сумма квадратов / Sum of squares	Средний квадрат / Mean square	F-критерий / F-value	P значение / p-value	Доля объясненной дисперсии / Explained variance, %[1]
Температура / Temperature	1	2294078	2294078	5,961	0,0259*	18,8%
Осадки / Precipitation	1	2840109	2840109	7,38	0,0147*	23,2%
Температура × Осадки / Temperature × Precipitation	1	554419	554419	1,441	0,2465	4,5%
Остаточная вариация / Residual error	17	6542600	384859			53,5%
Всего / Total	20	12231206				100,0%

[1] Рассчитывается как отношение суммы квадратов данного фактора к общей сумме квадратов / It is calculated as the ratio of the sum of the squares of the given factor to the total sum of squares.

Сезонная динамика потоков CO_2 в контрастные по климатическим условиям годы

Для анализа сезонных особенностей углеродного обмена была рассмотрена динамика NEE в двух климатически контрастных годах – 2016 и 2024 гг., характеризовавшихся соответственно выраженным годовым поглощением и положительным годовым NEE (рис. 4).

В 2016 г. в начале вегетационного периода формировалось устойчивое поглощение CO_2 до −500…−600 кг C/(га мес) при высоких значениях ГТК (>2). В июле–августе при снижении ГТК до значений менее 1 поглощение ослаблялось и кратковременно сменялось слабой эмиссией до +200 кг C/(га мес). В холодный период NEE принимал положительные значения.

В 2024 г. весеннее поглощение было значительно слабее (−200…−250 кг C/(га мес)), а с мая по октябрь модельные значения NEE преимущественно были положительными. Максимальная эмиссия в июле–августе достигала 450–500 кг C/(га мес) при ГТК около 1. В целом сезонная динамика 2024 г. характеризовалась существенно более слабым поглощением CO_2 по сравнению с 2016 г.

Сопоставление сезонной динамики NEE с метеорологическими параметрами (рис. 4) показывает существенные различия между контрастными годами. В 2016 г. сочетание более благоприятных температурно-влажностных условий в вегетационный период сопровождалось устойчивым поглощением CO_2, тогда как в 2024 г. повышенный температурный фон и ограниченная влагообеспеченность совпадали с ослаблением поглощения и преобладанием положительных значений NEE.

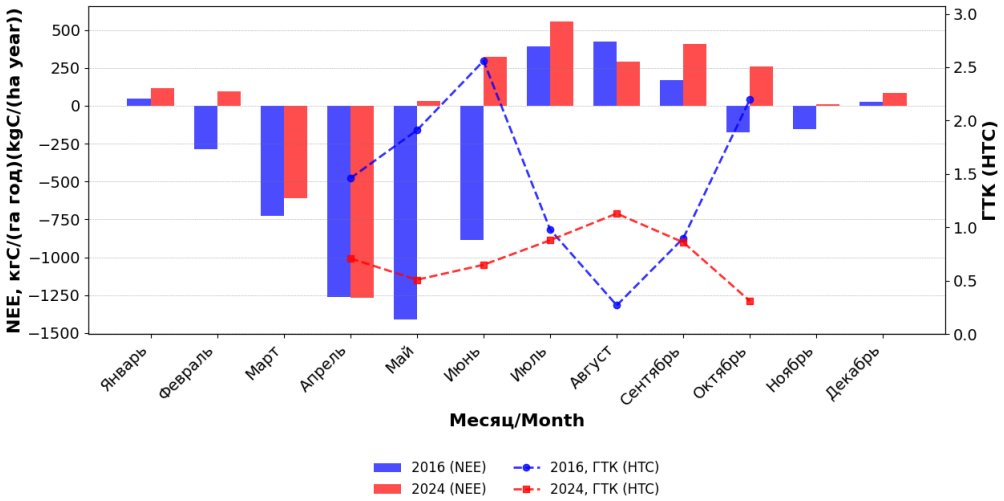

Рис. 4. Сезонная динамика нетто-экосистемного обмена (NEE) в 2016 и 2024 гг. /
Fig. 4. Seasonal dynamics of net ecosystem exchange (NEE) in 2016 and 2024

Для выявления причин межгодовой изменчивости NEE и анализа вклада основных компонент углеродного баланса были рассмотрены смоделированные годовые значения его основных составляющих (GPP, автотрофного дыхания растений (R_a) и гетеротрофного почвенного дыхания (R_h)) за период 2005–2025 гг. (рис. 5). Как показывают результаты расчетов, все компоненты углеродного баланса отличаются высокой межгодовой изменчивостью, отражающей различия в гидротермических условиях вегетационного периода.

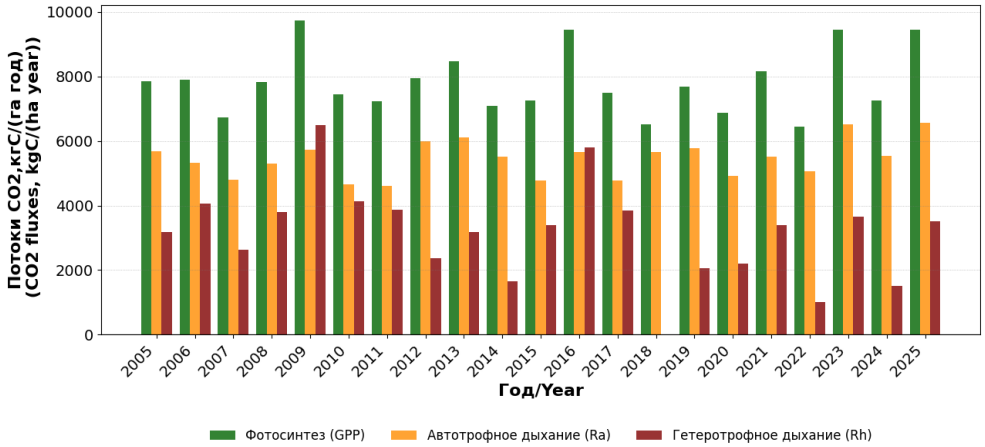

Рис. 5. Смоделированные годовые значения компонентов углеродного баланса: валовой первичной продукции (GPP), автотрофного дыхания (R_a) и гетеротрофного дыхания (R_h) за период 2005–2025 гг./

Fig. 5. Simulated annual values of carbon balance components: gross primary production (GPP), autotrophic respiration (R_a), and heterotrophic respiration (R_h) for the period 2005–2025

GPP изменялись в широком диапазоне от 6433 кг С/(га год) в экстремально засушливом 2024 г. до 9733 кг С/(га год) в аномально благоприятном по условиям увлажнения 2009 г., тогда как R_a имело меньшую амплитуду колебаний (от 4611 до 6559 кг С/(га год)). R_h также снижалось в засушливые годы и возрастало при благоприятном гидротермическом режиме. Положительное значение NEE в 2024 г. было связано прежде всего с уменьшением GPP, которое не компенсировалось сокращением RE.

В годы максимального поглощения CO_2 включая 2009 и 2016 гг., высокие значения GPP сочетались с увеличением R_h, однако прирост фотосинтетической продукции су-

щественно превышал потери на дыхание, что обеспечивало формирование отрицательного годового NEE.

В контрастном 2024 г. на фоне повышенного температурного режима и дефицита влаги наблюдалось резкое снижение GPP. Одновременно уменьшалось R_h, однако сокращение потерь на дыхание оказалось недостаточным для компенсации снижения ассимиляции, что привело к положительному годовому значению NEE.

Таким образом, межгодовая изменчивость NEE в значительной степени была связана с изменениями GPP и R_h в вегетационный период. При неблагоприятных температурно-влажностных условиях снижение GPP было более явным, чем сокращение эмиссионных потоков, тогда как R_a характеризовалось меньшей межгодовой изменчивостью.

Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют выявить основные закономерности влияния метеорологических факторов на углеродный обмен в широколиственном лесу Северного Кавказа. Ключевую роль в формировании годового и сезонного баланса играет соотношение между процессами ассимиляции углерода (фотосинтезом) и RE, который чувствителен к изменениям гидротермического режима. При этом выявленные зависимости следует рассматривать, прежде всего, как результат модельного эксперимента, характеризующий реакцию углеродного обмена на межгодовые и сезонные изменения температурно-влажностных условий.

Анализ годовой динамики NEE показывает, что на протяжении большей части периода наблюдений исследуемая экосистема являлась устойчивым поглотителем CO_2 из атмосферы. Этот вывод согласуется с современными представлениями о роли спелых широколиственных лесов умеренного пояса в региональном углеродном цикле [Швиденко, Щепащенко, 2014]. Вместе с тем модельные расчеты показывают тенденцию к ослаблению поглощения CO_2 в отдельные теплые и относительно засушливые годы, сопровождающуюся увеличением числа лет с положительными значениями NEE. Это указывает на потенциальное снижение устойчивости углеродного баланса к климатическим аномалиям. Полученный результат не следует интерпретировать как установленный переход экосистемы от нетто-поглотителя к нетто-источнику CO_2, поскольку абсолютные значения NEE не были непосредственно валидированы по натурным наблюдениям. Однако он позволяет предполагать, что дальнейшее усиление температурного стресса при ограниченной влагообеспеченности может повышать вероятность ослабления углеродного стока в исследуемом типе лесной экосистемы.

Наиболее интенсивное поглощение CO_2 в модельных расчетах, зафиксированное в 2009 и 2016 гг., совпадало с периодами повышенной влагообеспеченности и высоких значений гидротермического коэффициента (ГТК > 1,5). В такие годы формировались условия, при которых GPP существенно превышала RE. Аналогичные закономерности между влажностным режимом и усилением ассимиляционных процессов выявлены для лесных экосистем различных климатических зон [Reichstein et al., 2013]. Дополнительным фактором, усиливающим поглощение CO_2 в рассматриваемый период, может быть относительно умеренный температурный фон в 2006–2016 гг., способствующий снижению интенсивности R_a [Kim et al., 2025].

Начиная с 2018 г. в модельных расчетах прослеживается изменение режима углеродного обмена, связанное с сочетанием повышенного температурного фона и нормального или пониженного уровня осадков, при значениях ГТК преимущественно около 1–1,5. Подобное сочетание климатических факторов рассматривается как неблагоприятное для функционирования лесных экосистем, поскольку повышение температуры в условиях ограниченной влагообеспеченности может приводить к более выраженному снижению фотосинтетической активности по сравнению с изменениями эмиссионных

потоков [Zhang et al., 2017; Bastos et al., 2020]. В результате в модельном эксперименте экосистема в отдельные годы утрачивала способность к нетто-поглощению CO_2, что проявлялось в положительных значениях NEE.

Сезонный анализ для климатически контрастных лет (2016 и 2024 гг.) позволяет уточнить временные масштабы действия этих механизмов. Контраст 2016 и 2024 гг. показывает, что наиболее уязвимым периодом является начало и середина вегетационного сезона, когда дефицит влаги при повышенных температурах ограничивает фотосинтетическую продуктивность [Швиденко, Щепащенко, 2014]. При этом снижение R_h при водном стрессе не обязательно компенсирует снижение GPP, вследствие чего годовой NEE может смещаться в область положительных значений. Подобные сценарии рассматриваются как один из возможных вариантов реакции лесных экосистем в условиях современного и прогнозируемого роста глобальной температуры [IPCC…, 2021].

Вместе с тем интерпретация выявленной зависимости только через температурно-влажностный стресс требует осторожности. Исследуемый участок характеризуется сложным рельефом и выраженной пространственной неоднородностью условий произрастания, вследствие чего влияние температуры и осадков на углеродный обмен может модифицироваться экспозицией и крутизной склонов, особенностями поверхностного стока, глубиной залегания грунтовых вод, свойствами почвы, а также пространственным распределением растительного опада и мортмассы. Эти факторы в настоящем исследовании не рассматривались как самостоятельные пространственно распределенные регуляторы NEE, что ограничивает возможность прямого переноса выявленных зависимостей на каждый отдельный микроландшафт исследуемой территории.

Анализ динамики ключевых составляющих углеродного баланса позволяет дополнительно уточнить выявленные закономерности. В годы максимального поглощения CO_2 высокие значения GPP сопровождались также увеличением R_h, однако прирост ассимилированного углерода существенно превышал почвенные потери CO_2. В 2024 г. наблюдалось резкое подавление как GPP, так и гетеротрофного дыхания, что отражает чувствительность микробных процессов к изменениям влагообеспеченности почвы. Тем не менее даже столь значительное снижение R_h не компенсировало падения скорости ассимиляционных процессов, что в итоге привело к положительному годовому значению NEE. R_a при этом показывало более инерционный характер и меньшую амплитуду отклика на климатические аномалии, что также отмечается в ряде исследований [Reichstein et al., 2013].

Следует отметить, что полученные результаты не позволяют однозначно выделить температуру как единственный или доминирующий фактор межгодовой изменчивости NEE. Результаты дисперсионного анализа показывают сопоставимый вклад температуры и осадков в объясненную вариацию NEE, тогда как значительная доля остаточной вариации указывает на влияние других факторов, не включенных в рассматриваемую двухфакторную схему. Поэтому выявленная реакция NEE, вероятно, определяется совокупным воздействием температурного режима, влагообеспеченности и особенностей пространственно-временного состояния экосистемы.

Таким образом, полученные результаты показывают высокую чувствительность смоделированного углеродного обмена широколиственного леса предгорной зоны Северного Кавказа к изменениям температурно-влажностных условий, особенно в течение вегетационного периода. Межгодовые и сезонные различия NEE в значительной степени связаны с изменениями GPP, тогда как снижение эмиссионных потоков при дефиците влаги не всегда компенсирует уменьшение ассимиляции углерода. Вместе с тем выявленные зависимости следует рассматривать с учетом ограничений модельного подхода.

Количественные оценки потоков CO_2 в настоящей работе получены исключительно на основе численного моделирования и не подвергались прямой валидации по данным натурных измерений NEE непосредственно на исследуемом участке. Проведение такой

валидации для рассматриваемой территории сопряжено с существенными методическими ограничениями, обусловленными сложным рельефом, значительным перепадом высот и выраженной пространственной неоднородностью растительного и почвенного покрова. Локальные измерения потоков CO_2, даже при их наличии на отдельных точках, не могут непосредственно характеризовать пространственно интегрированный поток для всей исследуемой территории без дополнительного масштабирования и учета ландшафтной неоднородности [Bastos et al., 2020]. Поэтому абсолютные значения NEE следует рассматривать как модельные оценки, чувствительные к параметризации Forest-DNDC, заданным характеристикам растительности и почвы и качеству метеорологических входных данных. В то же время анализ межгодовой и сезонной изменчивости и сопоставление модельных потоков с изменениями температурно-влажностных условий позволяют оценивать направление и характер модельной реакции углеродного обмена экосистемы на климатическую изменчивость.

Заключение

На основе численного моделирования с использованием процесс-ориентированной биогеохимической модели Forest-DNDC выполнена оценка межгодовой и сезонной изменчивости потоков CO_2 в широколиственном лесу предгорной зоны Северного Кавказа. Результаты моделирования показали существенную изменчивость углеродного баланса в зависимости от сочетания температурных и гидрологических условий.

Показано, что в годы с повышенной влагообеспеченностью и благоприятными гидротермическими условиями модельные значения NEE характеризовались сильным поглощением CO_2, достигающим 2000–2500 кг С/га в год. В отдельные теплые и засушливые годы NEE, напротив, принимал положительные значения до 200–400 кг С/га в год. Таким образом, изменение температурно-влажностных условий может сопровождаться существенным ослаблением поглощения CO_2 и смещением годового баланса в сторону эмиссии.

Анализ компонентов углеродного баланса показал, что межгодовая изменчивость NEE в значительной степени связана с вариациями GPP и R_h, тогда как R_a характеризуется меньшей амплитудой отклика на климатические условия. В засушливые годы снижение GPP оказывалось более выраженным, чем сокращение R_h, вследствие чего уменьшение потерь на дыхание не компенсировало ослабление ассимиляции углерода.

Сезонный анализ показал, что ключевые изменения углеродного баланса формируются преимущественно в вегетационный период. Наиболее выраженное ослабление поглощения CO_2 наблюдалось при сочетании повышенных температур и недостаточной влагообеспеченности, когда снижение фотосинтетической активности ограничивало GPP и приводило к смещению NEE в сторону положительных значений. При этом результаты дисперсионного анализа указывают на совместное влияние температуры и осадков и на существенную роль факторов, не учтенных в рассматриваемой климатической схеме.

Полученные результаты показывают перспективность применения процесс-ориентированного моделирования для анализа углеродного обмена горных лесных экосистем при ограниченной возможности пространственно репрезентативных натурных наблюдений. Вместе с тем абсолютные значения NEE в настоящей работе не подвергались прямой валидации по данным измерений непосредственно на исследуемой территории. Они должны рассматриваться как модельные оценки, чувствительные к параметризации Forest-DNDC, характеристикам растительности и почвы, а также качеству метеорологических входных данных. Высокая пространственная неоднородность рельефа, почвенного и растительного покрова дополнительно ограничивает возможность прямого сопоставления локальных измерений с интегральными модельными оценками.

Таким образом, результаты исследования показывают, что углеродный баланс широколиственных лесов Северного Кавказа может существенно изменяться в зависимости от межгодовых и сезонных температурно-влажностных условий. Выявленная чувствительность экосистемы к климатическим аномалиям указывает на необходимость дальнейшего совершенствования пространственной параметризации и региональной калибровки Forest-DNDC, а также интеграции модельных расчетов с независимыми полевыми и дистанционными наблюдениями. Расширение пространственного охвата и проведение прогнозных расчетов по различным климатическим сценариям позволят повысить надежность оценки будущей роли горных лесов в региональном углеродном цикле.

Литература

1. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С.К. Гулева, А.В. Ольчева. – М.: Научный мир, 2025. – 420 с.

2. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3(25). – С. 35–47. DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004.

3. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу») // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015.

4. Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В., Керимов И.А. Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012.

5. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 1. – С. 69–92.

6. Adams H.D., Zeppel M.J.B., Anderegg W.R.L., Hartmann H. et al. A multispecies synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality // Nature Ecology and Evolution. – 2017. – Vol. 1. No. 9. – pp. 1285–1291. DOI: 10.1038/s41559-017-0248-x.

7. Bastos A., O'Sullivan M., Ciais P., Makowski D. et al. Sources of uncertainty in regional and global terrestrial CO2 exchange estimates // Global Biogeochemical Cycles. – 2020. – Vol. 34. DOI: 10.1029/2019GB006393.

8. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Dorothee C.E. Bakker et al. Global Carbon Budget 2024 // Earth System Science Data. – 2025. – Vol. 17. – pp. 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.

9. Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L.M., Chadwick D.R., Li C. et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model Evolution // Ecological Modelling. – 2014. – Vol. 292. – pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.

10. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. – 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

11. Kim H., Kim S., Woo S., Min K. Soil heterotrophic and autotrophic respiration respond differently to seasonal variations in temperature and water content under monsoon continental climate // Scientific Reports. – 2025. – No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-06082-x.

12. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I.C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system // Global Biogeochemical Cycles. – 2005. – Vol. 19. – GB1015. DOI: 10.1029/2003GB002199.

13. Li C., Aber J., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 1. Model development // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2000. – Vol. 105. No. D4. – pp. 4369–4384.

14. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1992. – Vol. 97. No. D9. – pp. 9759–9776.

15. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century // Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics. – 2025. – Vol. 61. Suppl. 1. – pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166

16. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink // Nature. – 2024. – Vol. 631. – pp. 563–569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.

17. Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D. et al. Climate extremes and the carbon cycle // Nature. – 2013. – Vol. 500. No. 7462. – pp. 287–295. DOI: 10.1038/nature12350.

18. Serykh I., Krasheninnikova S., Safarov S., Safarov E., Oskouei E.A., Gorbunova T., Gorbunov R., Falamarzi Y. Near-surface temperature climate change in the Caspian region: a study using meteorological station data, reanalyses, and CMIP6 models // Climate. – 2025. – Vol. 13. No. 10. – Art. No. 201. DOI: 10.3390/cli13100201.

19. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // Global Change Biology. – 2003. – Vol. 9. No. 2. – pp. 161–185.

20. Thum T., Caldararu S., Engel J., Kern M., Pallandt M. et al. A new model of the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in the terrestrial biosphere (QUINCY v1.0; revision 1996) // Geoscientific Model Development. – 2019. – Vol. 12. No. 11. – pp. 4781–4802. DOI: 10.5194/gmd-12-4781-2019.

21. White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls // Earth Interactions. – 2000. – Vol. 4. No. 3. – pp. 1–85.

22. Zhang Y., Xiao X., Wu X., Zhou S., Zhang G. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016 // Scientific Data. – 2017. – Vol. 4. No. 1. – Art. No. 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.

References

1. Carbon supersites: monitoring, geographic information systems, and sequestration technologies. Eds. S.K. Gulev, A.V. Olchev. Moscow. Nauchny Mir. 2025. 420 p. (In Russ.)

2. Kerimov I.A., Gayrabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. Grozny Natural Science Bulletin. 2021. Vol. 6. No. 3/25. pp. 35–47. DOI: 10.25744/genb.2021.28.73.004. (In Russ.)

3. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”). Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 180–191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015. (In Russ.)

4. Mukhartova Yu.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012. (In Russ.)

5. Shvidenko A., Schepaschenko D. Carbon budget of Russian forests. Siberian Journal of Forest Science. 2014. Vol. 1. pp. 69–92. (In Russ.)

6. Adams H.D., Zeppel M.J.B., Anderegg W.R.L., Hartmann H. et al. A multispecies synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. Nature Ecology and Evolution. 2017. Vol. 1. No. 9. pp. 1285–1291. DOI: 10.1038/s41559-017-0248-x.

7. Bastos A., O’Sullivan M., Ciais P., Makowski D. et al. Sources of uncertainty in regional and global terrestrial CO2 exchange estimates. Global Biogeochemical Cycles. 2020. Vol. 34. DOI: 10.1029/2019GB006393.

8. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Dorothee C.E. Bakker et al. Global Carbon Budget 2024. Earth System Science Data. 2025. Vol. 17. pp. 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.

9. Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L.M., Chadwick D.R., Li C. et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model Evolution. Ecological Modelling. 2014. Vol. 292. pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.

10. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci,

R. Yu, and B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

11. Kim H., Kim S., Woo S., Min K. Soil heterotrophic and autotrophic respiration respond differently to seasonal variations in temperature and water content under monsoon continental climate. Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-06082-x.

12. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I.C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. Global Biogeochemical Cycles. 2005. Vol. 19. GB1015. DOI: 10.1029/2003GB002199.

13. Li C., Aber J., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2000. Vol. 105. No. D4. pp. 4369–4384.

14. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1992. Vol. 97. No. D9. pp. 9759–9776.

15. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. Vol. 61. Suppl. 1. pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166.

16. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink. Nature. 2024. Vol. 631. pp. 563–569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.

17. Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D. et al. Climate extremes and the carbon cycle. Nature. 2013. Vol. 500. No. 7462. pp. 287–295. DOI: 10.1038/nature12350.

18. Serykh I., Krasheninnikova S., Safarov S., Safarov E., Oskouei E.A., Gorbunova T., Gorbunov R., Falamarzi Y. Near-surface temperature climate change in the Caspian region: a study using meteorological station data, reanalyses, and CMIP6 models. Climate. 2025. Vol. 13. No. 10. Art. No. 201. DOI: 10.3390/cli13100201.

19. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. Global Change Biology. 2003. Vol. 9. No. 2. pp. 161–185.

20. Thum T., Caldararu S., Engel J., Kern M., Pallandt M. et al. A new model of the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in the terrestrial biosphere (QUINCY v1.0; revision 1996). Geoscientific Model Development. 2019. Vol. 12. No. 11. pp. 4781–4802. DOI: 10.5194/gmd-12-4781-2019.

21. White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. Earth Interactions. 2000. Vol. 4. No. 3. pp. 1–85.

22. Zhang Y., Xiao X., Wu X., Zhou S., Zhang G. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. Scientific Data. 2017. Vol. 4. No. 1. Art. No. 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.