

Оригинальная статья / Original article
УДК 528.94:504 (571.150)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-7



Углеродный баланс в степных и лесостепных агроэкосистемах Алтайского края

Бэлла А. Краснаярова, Антон Е. Назаренко, Татьяна Г. Плуталова, Софья Н. Шарабарина

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

Контактное лицо

Антон Е. Назаренко, кандидат географических наук, младший научный сотрудник, лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук; 656038 Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.
Тел. +79039112358
Email nazarenko.iwep@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8613-6667>

Формат цитирования

Краснаярова Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н. Углеродный баланс в степных и лесостепных агроэкосистемах Алтайского края // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 1. С. 68-79. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-7

Получена 29 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 14 сентября 2024 г.

Принята 15 января 2025 г.

Резюме

Оценка углеродного баланса почв пахотных земель модельных сельхозпредприятий в различных природных условиях в границах Алтайского края с целью снижения эмиссии углерода.

Исследование охватывает 4 предприятия, более 30 тыс. га пахотных земель и 13 сельскохозяйственных культур. В качестве методической основы оценок выступает методика определения объемов выбросов и поглощений парниковых газов, утвержденная Минприроды РФ в 2022 г.

На каждом из модельных предприятий почва под различными культурами имеет уникальный углеродный баланс, в связи с чем выбор выращиваемых культур и технологий их возделывания предопределяет углеродный баланс сельхозпредприятия. Максимальный вклад в накопление углерода вносит поступление в почву растительных остатков, важную роль также играет и внесение минеральных удобрений. Основными составляющими эмиссии углерода выступают его потери с сенокошением, эрозией и дефляцией. Дыхание почвы в общем углеродном балансе занимает незначительную долю.

В сухостепной зоне для всех видов исследованных культур, кроме яровой пшеницы, выявлен отрицательный углеродный баланс. В лесостепной зоне накопление углерода отмечено для пшеницы, рапса и ячменя, потери – для гречихи и гороха. В предгорной степной зоне увеличение углерода в почве также характерно для пшеницы, ячменя и подсолнечника, снижение – для гречихи, сои, рапса, люцерны и сенажа. Наибольшими потерями углерода характеризуются поля, занятые кормовыми культурами, что является следствием изъятия растительных остатков при уборке.

Ключевые слова

Агроэкосистемы, углеродный баланс, сельское хозяйство, степь, лесостепь, дистанционное зондирование.

Carbon balance in steppe and forest-steppe agroecosystems of Altai Territory

Bella A. Krasnoyarova, Anton E. Nazarenko, Tatiana G. Plutalova and Sofia N. Sharabarina

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

Principal contact

Anton E. Nazarenko, PhD, Junior Researcher,
Laboratory of Landscape-Water-Environmental
Research and Nature Management, Institute
for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences;
21 Molodegnaya St, Barnaul, Russia 656038.
Tel. +79039112358

Email nazarenko.iwep@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8613-6667>

How to cite this article

Krasnoyarova B.A., Nazarenko A.E., Plutalova T.G.,
Sharabarina S.N. Carbon balance in steppe and
forest-steppe agroecosystems of Altai Territory.
South of Russia: ecology, development. 2025;
20(1):68-79. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-
2025-1-7

Received 29 March 2024

Revised 14 September 2024

Accepted 15 January 2025

Abstract

Carbon balance assessment of farms in various natural conditions within the boundaries of the Altai Territory in order to reduce carbon emissions.

The study covers 4 farms, more than 30 thousand hectares of arable land and 13 agricultural crops. The methodological basis for the assessments is the methodology for determining the volumes of emissions and absorption of greenhouse gases approved by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation in 2022.

On each farm, the soil under different crops has a unique carbon balance and therefore the choice of crops grown and their cultivation technologies determines the carbon balance of the farm. The maximum contribution to carbon accumulation comes from the entry of plant residues into the soil; the application of mineral fertilizers also plays an important role. The main components of carbon emissions are its losses through haymaking, erosion and deflation. Soil respiration takes up a small share in the overall carbon balance.

In the dry steppe zone, a negative carbon balance was revealed for all types of crops studied, except for spring wheat. In the forest-steppe zone, carbon accumulation was noted for wheat, rapeseed and barley, and losses were noted for buckwheat and peas. In the foothill steppe zone, an increase in carbon in the soil is also typical for wheat, barley and sunflower, while a decrease is typical for buckwheat, soybeans, rapeseed, alfalfa and haylage. The greatest carbon losses occur in fields occupied by forage crops, which is associated with the removal of plant residues during harvesting.

Key Words

Agroecosystems, carbon balance, agriculture, steppe, forest-steppe, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Борьбе с повышением концентрации парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в атмосфере в настоящее время уделяется пристальное внимание, как в науке, так и в политике. Этому вопросу посвящен ряд международных соглашений: Рамочная конвенция ООН об изменении климата (1992) [1], Киотский протокол (1997) [2], Парижское соглашение (2015) [3] и др. На постоянной основе проводит исследования Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC [4]), по итогам пятого оценочного доклада которой и было заключено вышеуказанное Парижское соглашение.

Развиваются и механизмы учета и снижения объемов выбросов парниковых газов. В ряде стран утверждаются методики инвентаризации парниковых газов на основе рекомендаций МГЭИК, постепенно вводится обязательная отчетность для ряда отраслей по данной категории выбросов. В России это направление исследований получило активное развитие с созданием карбоновых полигонов – территорий, на которых проводится разработка и испытание технологий контроля баланса климатически активных газов природных экосистем. На данный момент на территории страны действует 18 таких полигонов общей площадью более 39 тыс. га [5]. Развиваются и системы мониторинга парниковых газов – RuFlux [6], ИАС «Углерод-Э» [7].

Что касается практики учета парниковых газов применительно к хозяйствующим субъектам, в России, как и в ряде европейских стран, рекомендации по добровольной инвентаризации парниковых газов были утверждены Минприроды в 2015 году [8], а с 2023 года предприятия, имеющие объемы выбросов более 150 тыс. тонн CO_2 экв. и относящиеся к регулируемым отраслям, обязаны ежегодно предоставлять отчетность о выбросах парниковых газов. К регулируемым относят отрасли, производство в которых сопровождается стационарным сжиганием топлива: нефте- и газодобывающую отрасль; угольную промышленность; металлургию; производство минеральных материалов (цемента, извести, стекла и др.); химическую промышленность; транспорт; обращение с отходами [9].

На основе проводимого учета в дальнейшей перспективе предполагается развитие механизмов компенсационных платежей за выбросы парниковых газов, средства которых планируется направить на разработку и внедрение новых технологий, позволяющих снизить выбросы. Данные механизмы реализуются в ряде стран, в том числе в Китае, ЕС, США, Новой Зеландии, Канаде, Южной Корее и в некоторых других странах в виде бирж торговли углеродными квотами [10].

С октября 2023 года в ЕС действует механизм трансграничной корректировки углеродных выбросов (СВАМ), в соответствии с которым компании, импортирующие определенную продукцию в ЕС (сталь, алюминий, удобрения, цемент, водород, электроэнергия), обязаны отчитываться об углеродном следе данной продукции, а с 2026 года – оплачивать её углеродный след покупкой специальных сертификатов. Данная мера в значительной степени снижает конкурентоспособность продукции стран-экспортеров,

поставляющих продукцию в ЕС, в связи с чем Китай, Индия, Турция и Казахстан разрабатывают собственное аналогичное углеродное регулирование. Возможность введения платы за выбросы парниковых газов и организацию торговли углеродными квотами обсуждаются и в Правительстве РФ [11].

В качестве научной основы данных решений и механизмов, как и в основе всех стремлений предотвратить дальнейшее повышение концентрации парниковых газов в атмосфере лежит концепция «углеродной нейтральности», которая предполагает переход к таким технологиям хозяйства, при которых содержание парниковых газов в атмосфере стабилизируется [12].

Под углеродным балансом понимают соотношение в количестве накопленного и потерянного углерода в течение времени в сложных природных системах – почве, лесах, водоемах и др., которые выступают в качестве резервуаров, «пулов» углерода [13–15]. Изменение количества углерода в данных резервуарах, как правило, характеризует интенсивность поглощения CO_2 из атмосферы или (в случае отрицательных значений баланса) его эмиссию, а также характеризует изменение плодородия почв. Этой тематике посвящен ряд работ отечественных исследователей [15–22].

Также большое внимание уделяется исследованиям технологий и подходов повышения поглощающей способности территорий. В этом отношении агро(эко)системы представляют большой потенциал для изучения, так как секвестрация углерода из атмосферы – одна из важнейших функций почвы. Фоновые виды землепользования, в частности – сельское и лесное хозяйство, являются мощным поглотителем CO_2 : глобальные модели оценивают их углероддепонирующую способность в $11,2 \pm 2,6 \text{ ГтCO}_2/\text{год}$ из атмосферы в течение 2007–2016 годов [23]. При этом, почвы обладают и значительными запасами уже накопленного углерода, которые, по разным оценкам, кратно превышают общую наземную биомассу [15].

Выращивание сельскохозяйственных культур – распашка, внесение удобрений, средств защиты посевов, уборка урожая – вносит ряд изменений в естественный процесс круговорота углерода в почвах пахотных земель. В связи с этим важно проведение оценок углеродного баланса растениеводческих предприятий, осуществляющих деятельность в различных природных условиях и с различным набором выращиваемых культур, с целью изучения антропогенной составляющей круговорота углерода и разработки методов и технологий снижения эмиссии парниковых газов сельхозпредприятиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевые районы для оценок углеродного баланса сельского хозяйства были выбраны с учетом представленности основных природных условий в границах Алтайского края (рис. 1). Алтайский край входит в топ-10 аграрно-ориентированных регионов страны, расположен в пределах степной, лесостепной природных зон и горных областей Алтая и Салаира и отличается широким спектром агроклиматических условий.

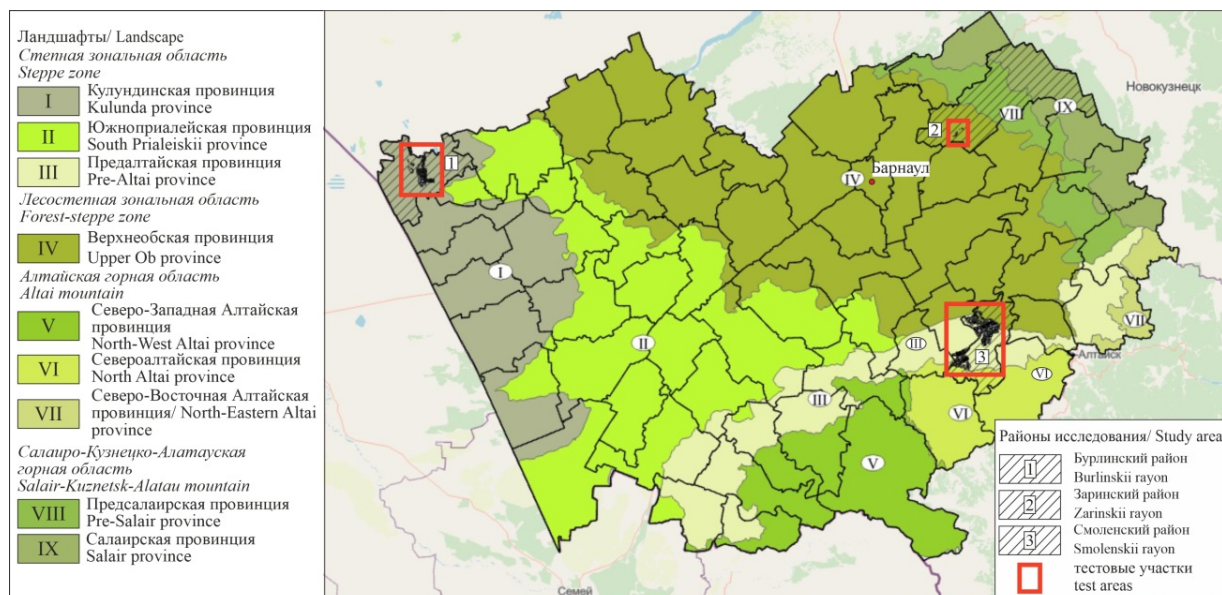


Рисунок 1. Территория исследования (на основе ландшафтной карты Алтайского края. Масштаб 1:500000 [24])

Figure 1. Study area (based on the landscape map of the Altai Territory. Scale 1:500000 [24])

Бурлинский район расположен в западной части Алтайского края на границе с Казахстаном в степной природной зоне (Кулундинская сухостепная ландшафтная провинция); Заринский район – в восточной части края в лесостепной природной зоне (Верхнеобская лесостепная ландшафтная провинция) на границе с Салаирской горной областью; Смоленский район – в южной части региона в предгорной зоне

большей частью в Предалтайской степной ландшафтной провинции на границе с Северо-Алтайской горной провинцией.

На территории данных районов были выбраны 4 сельскохозяйственных предприятия разных организационно-хозяйственных форм, структура посевных площадей которых включает практически все основные выращиваемые в Алтайском крае культуры (табл. 1).

Таблица 1. Структура посевных площадей модельных предприятий, 2022 г.

Table 1. Structure of cultivated areas of model farms, 2022

Предприятие Farm	Выращиваемые культуры Crops	Площадь, га Area, ha	Доля в структуре посевов предприятия, % Share in the structure of farm crops, %
ИП Дайрабаев М.М. (Бурлинский район) SE Dajrabaev M.M. (Burlinskiy region)	Пшеница яровая / Spring wheat	500	14,71
	Подсолнечник / Sunflower	1200	35,29
	Сенаж / Haylage	200	5,88
	Лён / Flax	1100	32,35
	Суданская трава / Sudanese sorghum	400	11,76
АО «ПЗ Бурлинский» (Бурлинский район) JSC PZ Burlinskiy (Burlinskiy region)	Пшеница яровая / Spring wheat	734	13,98
	Подсолнечник / Sunflower	856	16,30
	Сенаж / Haylage	1800	34,29
	Кукуруза / Corn	1400	26,67
	Ячмень / Barley	460	8,76
КФХ Тузовский Я.М. (Заринский район) Tuzovskiy Ia.M. farm (Zarinskii region)	Пшеница яровая / Spring wheat	70	12,99
	Гречиха / Buckwheat	125	23,19
	Рапс / Rapeseed	162	30,06
	Ячмень / Barley	138	25,60
	Горох / Peas	44	8,16
ООО «Агро-Сибирь» (Смоленский район) Agro-Sibir LLC (Smolenskii region)	Пшеница яровая / Spring wheat	7069,1	33,38
	Пшеница озимая / Winter wheat	1138,1	5,37
	Ячмень / Barley	470,5	2,22
	Гречиха / Buckwheat	3651	17,24
	Подсолнечник / Sunflower	2404,2	11,35
	Соя / Soybean	1526,9	7,21
	Рапс / Rapeseed	746	3,52
	Люцерна / Alfalfa	1433,9	6,77
	Сенаж / Haylage	2738,4	12,93

В целом, следует отметить, что выбор выращиваемых культур на предприятиях обусловлен агроклимати-

ческими и почвенными условиями: при недостаточном увлажнении степных районов предпочтение отдают

техническим культурам, в условиях достаточного увлажнения и более насыщенных гумусом почв – зерновым и зернобобовым. Кроме того, важным аспектом выбора выращиваемых культур выступает их рентабельность. Так, в Заринском районе выращивают большие площади рапса по причине его высокой рентабельности и экспортоориентированности.

Углеродный баланс почв под выращиваемыми культурами рассчитан по методике, отраженной в Приказе Минприроды РФ от 27 мая 2022 г. N 371 [25]. Рассмотрение модели ROTHС [26] показало, что она не подходит для целей исследования в силу того, что последнее обновление алгоритма и баз данных датировано 2009 годом и не учитывает ряд более

поздних результатов. Данная модель рассчитывает только процесс выбросов парниковых газов от разложения растительных остатков, и не принимает во внимание два других критически важных фактора – внесение удобрений и средств защиты посевов, сжигание топлива.

В соответствии с методикой Минприроды, основными компонентами расчета углеродного баланса почв пахотных земель выступают поступление углерода с удобрениями и растительными остатками (как поверхностными, так и корневыми), вымывание углерода в процессе ветровой и водной эрозии, дыхание почв, потери углерода при сенокошении (1):

$$\Delta C = (C_{fert} + C_{plant}) - (C_{resp} + C_{eroston} + C_{hey}) \quad (1)$$

где ΔC – изменение запасов углерода в углеродном пуле почвы, тонн С/год; C_{fert} – поступление углерода с органическими и минеральными удобрениями, тонн С/год; C_{plant} – поступление углерода с приповерхностными и корневыми растительными остатками; C_{resp} – потери углерода с дыханием почв, тонн С/год;

$C_{eroston}$ – механические потери почвенного углерода в результате эрозии и дефляции, тонн С/год; C_{hey} – потери углерода с сенокошением, тонн С/год.

Алгоритм расчета составляющих углеродного баланса почв представлен в таблице 2.

Таблица 2. Формулы расчета компонентов углеродного баланса почвы [25]

Table 2. Formulas for calculating soil carbon balance components [25]

Формулы / Formulas	Показатели / Characteristics
$C_{fert} = \frac{M_i \times C_i}{100}$	M_i – масса внесенных удобрений по видам (i), тонн/год / mass of applied fertilizers by type (i), tons/year; C_i – содержание углерода в удобрениях, % / carbon content of fertilizers, %
$C_{plant} = C_{ab} + C_{un}$	C_{ab} – масса углерода, поступающего в почву с поверхностными растительными остатками, кг С/год / mass of carbon entering the soil with surface plant residues, kg C/year; C_{un} – масса углерода, поступающего в почву с корневыми растительными остатками, кг С/год / mass of carbon entering the soil with root plant residues, kg C/year;
$C_{ab} \text{ или } C_{un} = ((A_i \times Y_i + B_i) \times C_i) \times S_i$	Y_i – урожайность сельскохозяйственной культуры, ц/га / crop yield, hundred kg/ha; A_i, B_i – коэффициенты для расчета массы поверхностных и корневых растительных остатков сельскохозяйственной культуры i при определенном уровне урожайности [25] / coefficients for calculating the mass of surface and root plant residues of agricultural crop i at a certain yield level [25]. C_i – содержание углерода в биомассе культуры i, кг С / кг сухой массы / carbon content of crop biomass i, kg C / kg dry weight; S_i – площадь посевов культуры i, га / crop area i, ha
$C_{resp} = \frac{Area_i \times AC_{CO_2} \times Veg \times 0,6 \times 1,43}{100} \times \frac{12}{44}$	$Area_i$ – площадь почв пахотных земель типа i, га / the area of arable land soils of the type i, ha; AC_{CO_2} – серия средних коэффициентов по дыханию микрофлоры почв пахотных земель, мг CO ₂ / м ² / час / series of average coefficients for respiration of microflora of arable soils, mg CO ₂ / m ² / hour; Veg – продолжительность вегетационного периода, часов / duration of the growing season, hours; 0,6 – безразмерный коэффициент для исключения дыхания корней / dimensionless coefficient for eliminating root respiration; 1,43 – безразмерный коэффициент для включения холодного периода года в расчет дыхания почв / dimensionless coefficient for inclusion of the cold period of the year

	in the calculation of soil respiration; 12/44 – коэффициент пересчета единиц CO ₂ в углерод / CO ₂ to carbon conversion coefficient
$C_{eroston} = S_i \times EF_{eroston}$	S_i – площадь посевов культуры i , га / crop area i , ha. $EF_{eroston}$ – коэффициент потерь углерода при эрозии и дефляции, тонн C/га/год / coefficient of carbon loss due to erosion and deflation, tons C/ha/year
$C_{hey} = Y_{hey} \times 0,45$	Y_{hey} – валовой сбор сена, тонн сухого вещества в год / gross hay harvest, tons of dry weight per year; 0,45 – коэффициент учета содержания углерода в сене, кг C/кг сухого вещества / coefficient of accounting for carbon content in hay, kg C/kg dry weigh

Проведенные авторами оценки углеродного баланса основаны на данных, полученных в ходе экспедиционных исследований в период с 14.07.2023 по 21.07.2023. С применением данных ДЗЗ были созданы карты сельскохозяйственных угодий каждого предприятия, для чего была собрана база данных эталонов Landsat 8-9 (250 точек), которая содержит координаты посевных культур, их фотографии и фрагменты безоблачного снимка Landsat 8 OLI от 17 или 19 июля 2023 г. Фрагменты базы данных приведены в табл. 3., рис. 2.

Таблица 3. База данных посевов сельскохозяйственных культур (фрагмент)
Table 3. Agricultural crops database (fragment)

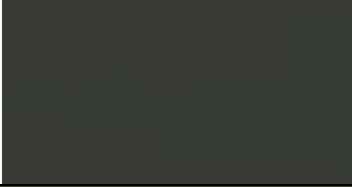
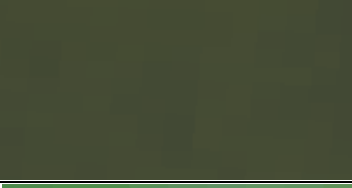
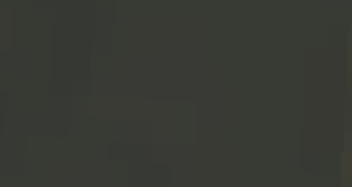
Эталон Landsat 8 OLI 19.07.2023 Landsat 8 OLI 19.07.2023	Фото на местности Location photo	Культура Crop
		гречиха buckwheat
		подсолнечник sunflower
		соя soybean
		рапс rapeseed
		горох peas
		ячмень barley



Рисунок 2. Расположение точек-образцов посевов сельскохозяйственных культур ООО Агро-Сибирь (фрагмент)
Figure 2. Location of sampling points of agricultural crops LLC Agro-Sibir (fragment)

Для получения данных о применяемых технологиях выращивания посевных культур, удобрениях и средствах защиты посевов, которые необходимы для расчета углеродного баланса растениеводства в соответствии с методикой Минприроды, было проведено анкетирование руководителей и агрономов модельных предприятий. По результатам составлена база данных показателей для оценки углеродного баланса, фрагмент которой приведен в табл. 4.

Таблица 4. Показатели для оценки углеродного баланса модельных сельскохозяйственных предприятий (фрагмент базы данных)

Table 4. Indicators for assessing carbon balance of model farms (database fragment)

Культуры Crops	S, га S, ha	Урожай, тонн Yield, tons	Обращение с растительными остатками Plant residues management	Годовой расход топлива (ДТ), л Fuel consumption per year (diesel oil), l	Удобрения, объем внесения, кг/га Fertilizers, application volume, kg/ha	Средства защиты посевов, объем внесения Crop protection products, application volume
Пшеница яровая Spring wheat	500	1300	измельчаются, запахиваются mulching	18000	NPK 16-16-16(6), 100	Торнадо-540 (1,5 кг/га) Балерина Форте (1л/га) Борей Нео (0,1 л/га) Tornado-540 (1,5 kg/ha) Balerina Forte (1 l/ha) Borej Neo (0,1 l/ha)
Подсолнечник Sunflower	1200	1320	измельчаются, запахиваются mulching	16800	NP(S) 20:20 (14), 70	Торнадо-540 (1,5 кг/га) Балий (0,6л/га) Борей Нео

						(0,1 л/га) Мортира (0,05 кг/га) Квик-степ (0,8л/га) Tornado-540 (1,5 kg/ha) Balij (0,6l/ha) Borej Neo (0,1 l/ha) Mortira (0,05 kg/ha) Kvik-step (0,8l/ha)
Сенаж Haylage	200	1600	скашиваются (продукция) mowing (products)	3000	АМУ 40%, 80	Борей Нео (0,1 л/га) Балерина Форте (1л/га) Borej Neo (0,1 l/ha) Balerina Forte (1l/ha)

На основе созданных баз данных проведено картографирование посевных площадей модельных сельхозпредприятий и оценен углеродный баланс почв для каждой выращиваемой культуры.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ
Результаты расчета углеродного баланса почв по культурам, выращиваемым на модельных предприя-
тиях, представлены на рисунке 3.

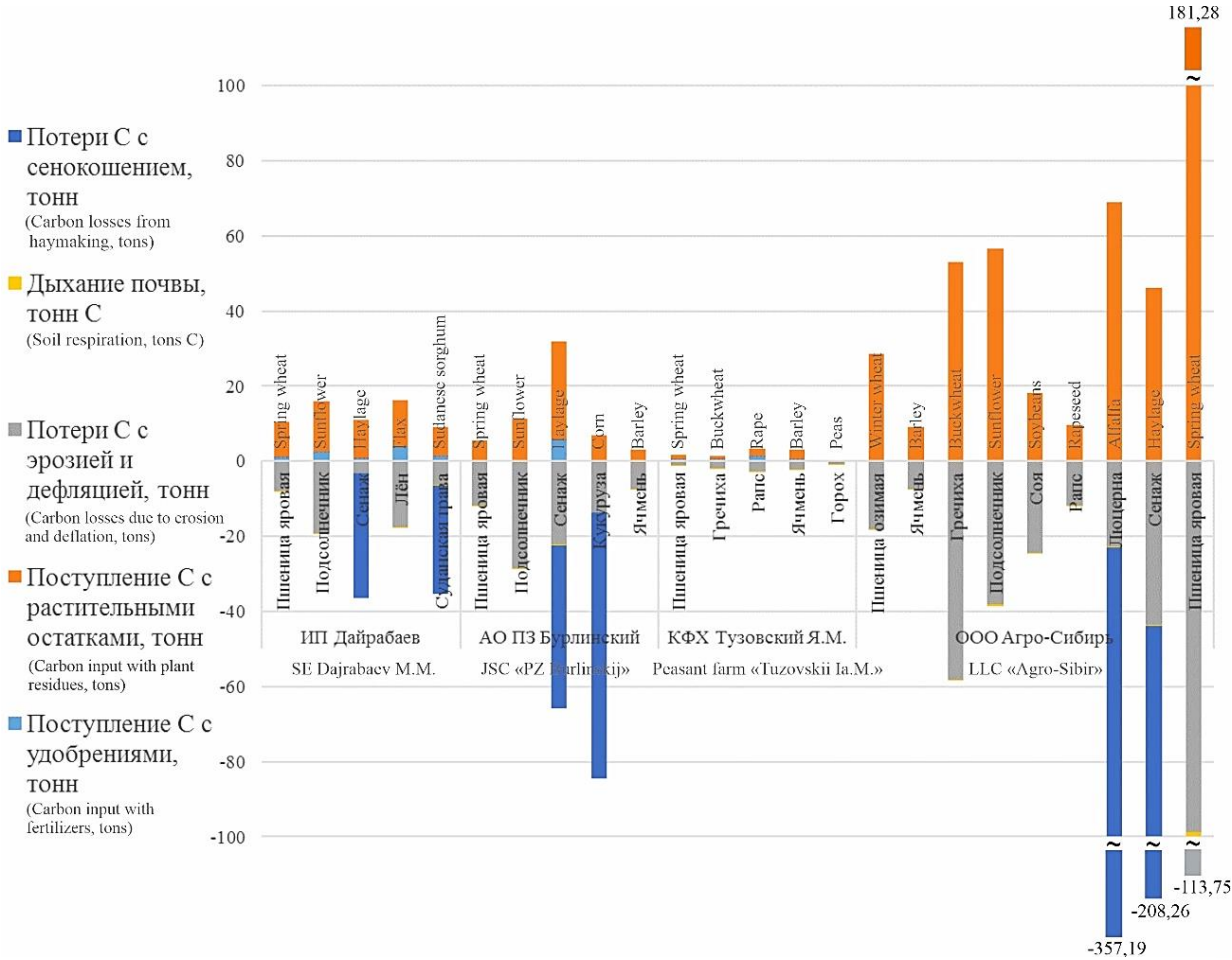


Рисунок 3. Составляющие углеродного баланса почв на модельных предприятиях, тонн С/год
Figure 3. Components of soil carbon balance of model farms, tons C per year

Наибольший вклад в накопление углерода в почве во всех модельных хозяйствах и по всем выращиваемым культурам вносит поступление в почву растительных остатков (поверхностных и корневых) посевных культур.

В связи с тем, что при выращивании различных культур и в различных природных и технологических условиях образуется разное количество растительных остатков, объемы накопления углерода в почве под данными

культурами различаются. Важную роль в накоплении углерода в процессе растениеводства также играет и внесение минеральных и органических удобрений, последние на модельных сельхозпредприятиях не вносятся.

Основными источниками эмиссии углерода выступают его потери с сенокошением, эрозией и

дефляцией. Дыхание почвы в общем углеродном балансе по данным проведенных расчетов занимает незначительную долю (0,05–1,18 % потерь углерода).

В расчете на 1 га посевной площади карта-схема углеродного баланса модельных хозяйств представлена на рисунке 4.

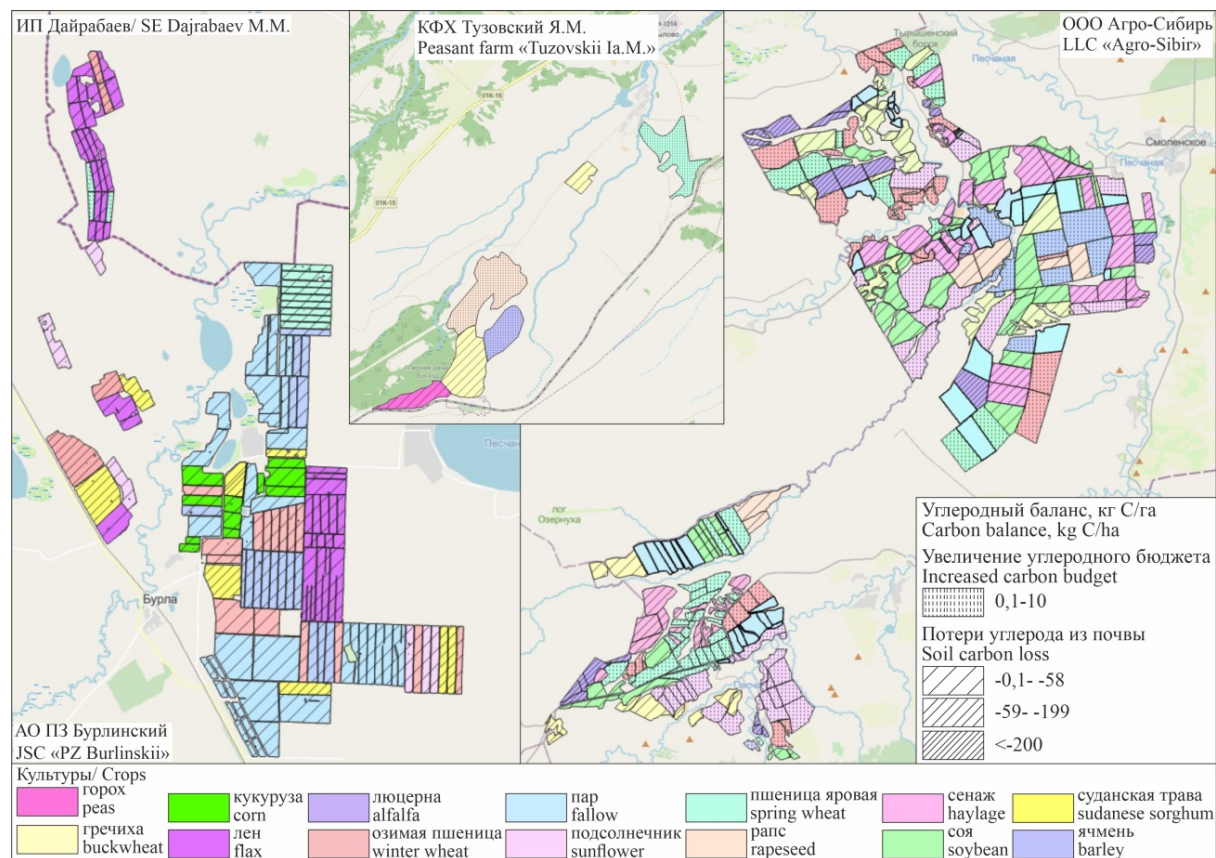


Рисунок 4. Карта-схема углеродного баланса модельных хозяйств

Figure 4. Carbon balance map of model farms

В Бурлинском районе отрицательный углеродный баланс отмечен для всех культур, кроме пшеницы яровой в ИП Дайрабаев М.М. (накопление углерода 4,72 кг С/га).

В Заринском районе накопление углерода отмечено для пшеницы (10,15 кг С/га), рапса (4,65 кг С/га) и ячменя (5,49 кг С/га), минимальные потери – для гречихи (-3,44 кг С/га) и гороха (-5,98 кг С/га). Прежде всего, это связано с культурой ведения сельского хозяйства – растительные остатки после уборки запахиваются в почву, выступают в роли удобрений и участвуют в накоплении гумуса.

В Смоленском районе, в ООО «Агро-Сибирь», накопление углерода в почве отмечено также для пшеницы яровой (9,55 кг С/га), пшеницы озимой (9,02 кг С/га), ячменя (3,59 кг С/га) и подсолнечника (7,58 кг С/га), потери – для гречихи (-1,46 кг С/га), сои (-4,18 кг С/га), рапса (-3,11 кг С/га), люцерны (-200,97 кг С/га) и сенажа (-59,15 кг С/га). Наибольшими потерями углерода характеризуются поля, занятые кормовыми культурами (люцерна, суданская трава, фуражный овес), что связано с изъятием большей части растительных остатков при уборке.

Сравнение полученных результатов с данными других исследований, например, выполненных научным коллективом под руководством Суховеевой

О.Э. с использованием углеродной модели DNDC, показало их сопоставимость. Оценки углеродного баланса почв агроценозов в хозяйствах Курской, Тульской, Рязанской областей и Чувашской республики по модели DNDC за период 1973–2023 гг. составили $89,7 \pm 244,6$ кг С/га/год [27]. Для модельных хозяйств Алтайского края с применением методики Минприроды в 2023 гг. получены значения $-95,41 \pm 105,56$ кг С/га/год, что подтверждает сопоставимость результатов при их некоторых различиях, обусловленных природными условиями, выращиваемыми культурами и моделями оценки.

ВЫВОДЫ

По результатам исследования выявлено, что на модельных предприятиях наибольший вклад в накопление углерода в почве вносит поступление растительных остатков. В связи с тем, что при выращивании культур в различных природных условиях возникает разная масса растительных остатков (и отличаются методы обращения с ними), объемы накопления углерода в почве под данными культурами значительно разнятся. Важную роль в накоплении углерода в процессе растениеводства также играет и внесение минеральных (азотных, фосфорных, калийных) удобрений. Основными источниками

эмиссии углерода выступают его потери с сенокосением, эрозией и дефляцией. Дыхание почвы в общем углеродном балансе занимает незначительную долю.

Для всех видов исследованных культур в сухостепной зоне, за исключением яровой пшеницы (ИП Дайрабаев М.М), отмечен отрицательный углеродный баланс, который характеризуется превышением потерь углерода над его накоплением. В лесостепной зоне накопление углерода отмечено для пшеницы, рапса и ячменя, потери – для гречихи и гороха, что связано, в том числе и с применяемыми методами обращения с растительными остатками: они после уборки урожая запахиваются в почву и участвуют в накоплении гумуса. В предгорной степной зоне накопление углерода в почве отмечено также для пшеницы, ячменя и подсолнечника, потери – для гречихи, сои, рапса, люцерны и сенажа. Наибольшими потерями углерода характеризуются поля, занятые кормовыми культурами, что связано с изъятием растительных остатков при уборке.

Таким образом, выращивание кормовых культур, в частности подразумевающих скашивание биомассы в качестве продукции, приводит к значительным потерям почвенного углерода, в то время как возделывание зерновых, в том числе яровой и озимой пшеницы, ячменя, способствует накоплению углерода в почвах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00253 «Трансформация системы землепользования как инструмент регулирования углеродного баланса аграрного региона» <https://rscf.ru/project/23-27-00253/> в Институте водных и экологических проблем СО РАН.

ACKNOWLEDGMENT

The research was carried out through the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00253 “Transformation of the Land Use System as a Tool for Regulating the Carbon Balance of an Agricultural Region” <https://rscf.ru/project/23-27-00253/> at the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.РКИК ООН // Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1992. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (дата обращения 18.01.2024)
- 2.Киотский протокол // Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1997. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения 18.01.2024)
- 3.Парижское соглашение // Организация Объединенных Наций. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения 18.01.2024).
- 4.IPCC. Climate Change 2023. Synthesis Report. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC>

- 5.С_AR6_SYR_LongerReport.pdf (дата обращения 12.02.2024)
- 5.Карбоновые полигоны Российской Федерации. URL: <https://carbon-polygons.ru/polygons/> (дата обращения 12.02.2024)
- 6.Сайт российской сети экологических наблюдений. Мониторинг потоков парниковых газов в России. URL: <https://ruflux.net/> (дата обращения: 27.02.2024)
- 7.Консорциум «Ритм углерода». ИАС «Углерод-Э» URL: <http://carbon.geosmis.ru/> (дата обращения: 27.02.2024)
- 8.Распоряжение Минприроды РФ от 16.04.2015 N 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256422/ (дата обращения: 18.01.2024)
- 9.Постановление Правительства РФ от 14.03.2022 N 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_411616/e12184983259a6cabb68fa8b5c7791b2c55b7751/#dst100018 (дата обращения: 18.01.2024)
10. Назаренко А.Е., Красноярова Б.А. Стоимостная оценка экосистемных услуг по депонированию углерода экосистемами Алтайского края как составляющая перехода к устойчивому развитию // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 4 (14). N 4. С. 89–99.
11. Ведомости. В Минэкономике оценили перспективы введения платы за углеродные выбросы. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2024/02/11/1019652-v-minekonomiki-schitayut> (дата обращения 12.02.2024)
12. Наумов А.В. Углеродный статус России и динамическое равновесие биосферы // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. N. 2. С. 62–67.
13. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. N. 9. С. 1049–1060.
14. Коломыц Э.Г. Углеродный баланс лесных экосистем Волжского бассейна в условиях глобального потепления: прогнозное ландшафтно-экологическое моделирование // Сибирский лесной журнал. 2021. N. 3. С. 56–75.
15. Калов Р.О., Гакаев Р.А. Место природных травяных экосистем в глобальном углеродном балансе // Проблемы региональной экологии. 2022. N. 6. С. 50–54.
16. Замолотчиков Д. Г. Углеродный цикл и изменения климата // Окружающая среда и энергосистемы. 2021. N. 2. С. 53–69.
17. Калинина Е.В., Рудакова Л.В., Шварцбург Я.Д. Углеродный баланс карбоновой фермы // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. N. 9. С. 28–32.
18. Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Гагаева З.Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем // Геология и Геофизика Юга России. 2022. Т. 12. N. 3. С. 170–181.
19. Куричева О.А. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. N. 4. С. 512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>

20. Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научный консультант», 2017. 82 с.
21. Занилов А.Х. и др. Динамика углеродного статуса почвы на ранней стадии роста растений ячменя под влиянием средств биоактивации почвы // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2023. N 5. С. 5–17.
22. Золотухин А.Н., Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Площадные показатели эмиссии CO₂ из почвы различных биотопов Медвенского района Курской области // Рациональное землепользование: оптимизация земледелия и растениеводства. Сборник докладов. 2021. С. 120–124.
23. IPCC 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems URL: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/> (дата обращения 18.01.2024)
24. Цимбалей Ю.М. Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500000; ред.: Л.Ф. Лубенец, С.В. Цибликина, Н.Ю. Курепина. Научное редактирование: Ю.И. Винокуров. Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2016.
25. Приказ Минприроды РФ от 27 мая 2022 г. N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_423207/ (дата обращения: 18.01.2024)
26. Rothamsted carbon model (ROTHC). URL: <https://www.rothamsted.ac.uk/> (дата обращения: 18.01.2024)
27. РНФ. Карточка проекта фундаментальных и поисковых научных исследований, поддержанного Российским научным фондом. URL: <https://www.rscf.ru/project/23-26-00191/> (дата обращения: 18.01.2024)
- REFERENCES**
1. United Nations Framework Convention on Climate Change. 1992. Available at: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (accessed 18.01.2024)
2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (accessed 18.01.2024)
3. The Paris Agreement. 2015. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (accessed 18.01.2024)
4. IPCC. Climate Change 2023. Synthesis Report. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPC_C_AR6_SYR_LongerReport.pdf (accessed 12.02.2024)
5. *Karbonovye poligony Rossiiskoi Federatsii* [Carbon polygons of the Russian Federation]. Available at: <https://carbon-polygons.ru/polygons/> (accessed 12.02.2024)
6. *Sait rossiiskoi seti ekologicheskikh nablyudenii. Monitoring potokov parnikovykh gazov v Rossii* [Website of the Russian environmental observation network. Monitoring greenhouse gas flows in Russia]. Available at: <https://ruflux.net/> (accessed 27.02.2024)
7. *Konsortsium «Ritm ugleroda». IAS «Uglerod-E»* [Consortium «Rhythm of Carbon». IAS «Uglerod-E»]. Available at: <http://carbon.geosmis.ru/> (accessed 27.02.2024)
8. *Rasporyazhenie Minprirody RF ot 16.04.2015 N 15-r «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii po provedeniyu dobrovol'noi inventarizatsii ob"ema vybrosov parnikovykh gazov v sub"ektakh Rossiiskoi Federatsii»* [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated April 16, 2015 N 15-r «On approval of methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the constituent entities of the Russian Federation»]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256422/ (accessed 18.01.2024)
9. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14.03.2022 N 355 «O kriteriyakh otneseniya yuridicheskikh lits i individual'nykh predprinimatelei k reguliruemym organizatsiyam»* [Decree of the Government of the Russian Federation of March 14, 2022 N 355 «On the criteria for classifying legal entities and individual entrepreneurs as regulated organizations»]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_411616/e12184983259a6cabb68fa8b5c7791b2c55b7751/#dst100018 (accessed 18.01.2024)
10. Nazarenko A.E., Krasnoyarova B.A. Valuation of ecosystem services for carbon sequestration by ecosystems of the Altai Krai as a component of the transition to sustainable development. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 2018, vol. 4 (14), no 4, pp. 89–99. (In Russian)
11. Vedomosti. *V Minekonomiki otsenili perspektivy vvedeniya platy za uglerodnye vybrosy* [Vedomosti The Ministry of Economy assessed the prospects for introducing a fee for carbon emissions]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2024/02/11/1019652-v-minekonomiki-schitayut> (accessed 12.02.2024)
12. Naumov A.V. Carbon status of Russia and the dynamic balance of the biosphere. *The Journal of Soils and Environment*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 62–67. (In Russian)
13. Kudayarov V.N. The current state of the carbon balance and the maximum capacity of soils to absorb carbon in Russia. *Eurasian Soil Science*, 2015, no. 9, pp. 1049–1060. (In Russian)
14. Kolomyts E.G. Carbon balance of forest ecosystems of the Volga basin under conditions of global warming: predictive landscape-ecological modeling. *Siberian Journal of Forest Science*, 2021, no. 3, pp. 56–75. (In Russian)
15. Kalov R.O., Gakaev R.A. The place of natural grass ecosystems in the global carbon balance. *Regional Environmental Issues*, 2022, no. 6, pp. 50–54. (In Russian)
16. Zamolodchikov D. G. Carbon cycle and climate change. *Environment and Energy Science*, 2021, no. 2, pp. 53–69. (In Russian)
17. Kalinina E.V., Rudakova L.V., Shvartsburd Ya.D. Carbon balance of a carbon farm. *Ecology and industry of Russia*, 2023, Vol. 27, no. 9, pp. 28–32. (In Russian)
18. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Gagaeva Z.Sh. Studying landscape structure to assess the carbon balance of mountain ecosystems. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2022, Vol. 12, no. 3, pp. 170–181. (In Russian)
19. Kuricheva O.A. et al. Monitoring ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: RuFlux network. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> (In Russian)
20. Fedorov B.G. *Rossiiskii uglerodnyi balans* [Russian carbon balance]. Moscow, 2017, 82 p. (In Russian)

21. Zanirov A.Kh. et al. Dynamics of soil carbon status at the early stage of barley plant growth under the influence of soil bioactivation agents. *News of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2023, no. 5, pp. 5–17. (In Russian)
22. Zolotukhin A.N., Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Ploshchadnye pokazateli emissii SO₂ iz pochvy razlichnykh biotopov Medvenskogo raiona Kurskoi oblasti [Areal indicators of CO₂ emission from the soil of various biotopes of the Medvensky district of the Kursk region]. *Ratsional'noe zemlepol'zovanie: optimizatsiya zemledeliya i rastenievodstva. Sbornik dokladov* [Rational land use: optimization of agriculture and crop production. Collection of reports]. 2021, pp. 120–124. (In Russian)
23. IPCC 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/> (accessed 18.01.2024)
24. Tsimbalei Yu.M. Landscape map of the Altai Territory. Scale 1:500000; ed.: L.F. Lubenets, S.V. Tsilikina, N.Yu. Kurepina. Scientific editing: Yu.I. Vinokurov. Barnaul, IWEP SB RAS, 2016.
25. *Prikaz Minprirody RF ot 27 maya 2022 g. N 371 «Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovykh gazov i pogloshchenii parnikovykh gazov»* [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated May 27, 2022 N 371 «On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas removals»]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_423207/ (accessed 18.01.2024)
26. Rothamsted carbon model (ROTHC). Available at: <https://www.rothamsted.ac.uk/> (accessed 18.01.2024)
27. *RNF. Kartochka proekta fundamental'nykh i poiskovykh nauchnykh issledovaniy, podderzhannogo Rossiiskim nauchnym fondom* [RSF. Card of the project of fundamental and exploratory scientific research supported by the Russian Science Foundation]. Available at: <https://www.rscf.ru/project/23-26-00191/> (accessed 18.01.2024)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Бэлла А. Красноярова, Антон Е. Назаренко, Татьяна Г. Плуталова, Софья Н. Шарабарина совместно собрали материалы исследования. Антон Е. Назаренко провел расчеты углеродного баланса. Татьяна Г. Плуталова картографировала результаты. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Bella A. Krasnoyaroova, Anton E. Nazarenko, Tatiana G. Plutalova and Sofia N. Sharabarina jointly collected the research materials. Anton E. Nazarenko carried out the carbon balance calculations. Tatiana G. Plutalova mapped the results. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Бэлла А. Красноярова / Bella A. Krasnoyaroova <https://orcid.org/0000-0002-0008-1635>
 Антон Е. Назаренко / Anton E. Nazarenko <https://orcid.org/0000-0002-8613-6667>
 Татьяна Г. Плуталова / Tatiana G. Plutalova <https://orcid.org/0000-0002-2349-9823>
 Софья Н. Шарабарина / Sofia N. Sharabarina <https://orcid.org/0000-0002-9322-3953>