

Оригинальная статья

УДК 631.4

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.3.499-516>**Оценка возможности прогноза эмиссии CO₂ в полевом эксперименте по показателям гумусного состояния при распашке залежных почв****К.Г. Гиниятуллин [✉], И.А. Сахабиев, Е.В. Смирнова, Д.В. Тишин, Т.А. Макарова***Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия*[✉]ginijatullin@mail.ru**Аннотация**

В модельном полевом эксперименте за два вегетационных периода (2022, 2023 гг.) на распаханых участках с низким, средним и высоким содержанием почвенного органического вещества (ПОВ) (варианты опыта) и соседних залежах (контроль) оценена возможность прогноза эмиссии CO₂ по показателям гумусного состояния старопахотного горизонта залежной светло-серой лесной почвы. Эмиссия CO₂ на распаханых участках в 3.2–3.4 выше в первый год, во второй год – в 2.6–3.3 раза, чем на залежи. Средняя разница эмиссии CO₂ между опытом и контролем составила для участка с низким содержанием ПОВ – 0.175, для участка со средним содержанием ПОВ – 0.214, для участка с высоким содержанием ПОВ – 0.225 г С-CO₂/(м²×ч). Содержание углерода, растворимого в смеси Na₄P₂O₇-NaOH (C_{шсл}), на участках со средним и высоким содержанием ПОВ значительно снижается, уменьшение содержания общего углерода (C_{общ}) не значительно, а содержание углерода, растворимого в кипящей воде (C_{кв}), возрастает. Содержание C_{шсл} является перспективным показателем гумусного состояния залежи для построения прогнозных моделей оценки эмиссии CO₂ при смене землепользования.

Ключевые слова: залежные почвы, гумусное состояние, изменение системы землепользования, эмиссия углекислого газа.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-24-00242).

Для цитирования: Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Смирнова Е.В., Тишин Д.В., Макарова Т.А. Оценка возможности прогноза эмиссии CO₂ в полевом эксперименте по показателям гумусного состояния при распашке залежных почв // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 3. С. 499–516. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.3.499-516>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.3.499-516>

Field evaluation of the potential for CO₂ emission prediction using humus parameters of fallow soils under tillage

K.G. Giniyatullin✉, I.A. Sahabiev, E.V. Smirnova, D.V. Tishin, T.A. Makarova

Kazan Federal University, Kazan, Russia

✉giniyatullin@mail.ru

Abstract

A model field experiment was carried out over two consecutive growing seasons (2022 and 2023) in the tilled areas with low, medium, and high levels of soil organic matter (SOM) (experimental sites) and adjacent fallows (control sites) to evaluate the potential for predicting CO₂ emissions from humus parameters of the old-arable horizon of fallow light gray forest soil. The CO₂ emissions from the experimental sites exceeded those from the fallows by 3.2–3.4 times in the first year and by 2.6–3.3 times in the second year. The mean differences in CO₂ emissions between the experimental and control sites were 0.175, 0.214, and 0.225 g C-CO₂/(m²×h) in case of low, medium, and high SOM levels, respectively. The content of Na₄P₂O₇-NaOH-soluble carbon (C_{alk}) decreased significantly at the sites with medium and high SOM levels, while the decline in total carbon (C_{tot}) was not significant, and boiling-water-soluble carbon (C_{bw}) increased. Among the studied parameters, C_{alk} showed the greatest potential as an indicator of humus state in fallow soils for predictive modeling of CO₂ emissions during land use change.

Keywords: fallow soils, humus state, changes in land use system, carbon dioxide emissions

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-24-00242).

For citation: Giniyatullin K.G., Sahabiev I.A., Smirnova E.V., Tishin D.V., Makarova T.A. Field evaluation of the potential for CO₂ emission prediction using humus parameters of fallow soils under tillage. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 3, pp. 499–516. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.3.499-516>. (In Russian)

Введение

Тенденция перевода сельскохозяйственных угодий в залежное состояние наблюдается в мире с 1950-х годов и характерна как для развитых, прежде всего Европы и Северной Америки, так и некоторых развивающихся стран [1, 2]. Процесс вывода земель из пахотного оборота затронул также страны Восточной Европы и Россию вследствие изменения экономических условий хозяйствования предприятий агропромышленного комплекса в последние три десятилетия [3]. Количественные оценки площадей пашни, выведенных из сельскохозяйственного оборота в России с 1990 г., сильно отличаются и могут составлять, по данным различных источников, от 9 до 45 млн га [3–8], то есть до 22 % от исходной

площади пахотных угодий. Вместе с тем необходимо отметить, что в последнее время в некоторых регионах России наблюдается и обратный процесс – возвращение залежных земель в пахотный оборот [8]. В будущем эта тенденция может усилиться, поскольку с 2021 г. в России были начаты масштабные работы по оценке состояния плодородия 8.9 млн га неиспользуемых пахотных земель и планируется вовлечение в пахотный оборот до 13.2 млн га залежей к 2030 году [9].

Последствия забрасывания сельскохозяйственных земель для биоразнообразия и других показателей экосистемного состояния территорий оцениваются неоднозначно. Они могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от статуса сохранности территории, агроклиматических условий и местных факторов [2, 10]. Постагрогенная трансформация почв, как правило, сопровождается увеличением содержания в почве органического вещества (ОВ) в верхнем слое старопахотного горизонта [11–15], а также существенным изменением его качественного состава [16–18]. Многие авторы отмечают важность изменения гумусного состояния залежных почв в аспекте секвестрации в них атмосферного углерода и предотвращения глобального изменения климата [19]. В работе [6] общий дополнительный сток углерода на заброшенных пахотных землях оценивается примерно в 155 ± 27 Мт С в год, что может покрывать, по мнению авторов, до 36 % выбросов CO₂, попадающего в атмосферу при сжигании ископаемого топлива.

Вместе с тем необходимо учитывать, что накопление ОВ под залежной растительностью происходит в основном за счет потенциально минерализуемого пула органических соединений [16]. Так, в работе [20] на примере изучения постагрогенных светло-серых лесных почв показано, что накопление ОВ в старопахотных горизонтах происходит преимущественно за счет лабильных, потенциально легко окисляемых органических соединений, главным образом фульватной природы. Неконтролируемое возвращение залежных земель в пахотный оборот без разработки необходимых агротехнических и мелиоративных мероприятий может привести к быстрой минерализации ОВ залежных почв и резкому увеличению эмиссии CO₂ в атмосферу, что, по мнению В.Н. Кудеярова [19], может представлять определенные экологические риски. Реалистичная оценка как масштабов секвестрации атмосферного углерода в залежных почвах различных регионов, так и прогноз масштабов эмиссии CO₂ при их распашке являются, безусловно, актуальными задачами современной науки. Неудивительно, что в последнее время наблюдается серьезный интерес к точным количественным оценкам залежных земель и их состояния в различных регионах мира (включая Россию), основанным, в том числе, на цифровом картографировании почвенного покрова и анализе данных дистанционного зондирования Земли [21–25]. Создание последовательных временных рядов данных дистанционного зондирования позволяет дать объективную оценку площадей земель, занятых залежной растительностью, и состояния постагрогенных почв в России в целом, а также в отдельных ее регионах. Использование данных дистанционного зондирования обеспечивает создание точных и надежных цифровых карт залежных земель. В работе Лесив с соавторами [26] представлены карты пахотных и заброшенных земель с общей точностью от 78 ± 3 до 95 ± 1 % для отдельных регионов бывшего Советского Союза. Такие карты могут продуктивно использоваться в будущем в качестве необходимого топографического материала как для реалистичной оценки секвестрационного потенциала залежных земель, так и для прогноза масштабов эмиссии CO₂ в атмосферу при возвращении постагрогенных почв в сельскохозяйственный оборот.

Сами по себе показатели интенсивности эмиссии CO₂ из различных почв в атмосфере являются малоинформативными без оценки баланса углерода в системе почва – растительность – атмосфера. Баланс CO₂ в экосистемах (NEP, net ecosystem production, г С/м² в год) оценивается по разности между годовым суммарным дыханием микроорганизмов (MR-microbial respiration, г С/м² в год), разлагающих ПОВ и растительные остатки, и чистой первичной продуктивностью фитоценоза (NPP, primary production г С/м² в год). Последняя представляет собой сумму ежегодного прироста надземной и подземной фитомассы (в пересчете на углерод) и характеризует поступление CO₂ из атмосферы в экосистему [27]. Отрицательные значения NEP соответствуют преобладанию стока CO₂ из атмосферы в различные компоненты экосистемы, а положительные, наоборот, преобладанию эмиссии CO₂. Вместе с тем необходимо учитывать, что сток углерода в экосистемную продукцию почв, в отличие от накопления в почвах ОБ в устойчивых к минерализации формах, может определять только краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода [28, 29]. При проведении балансовых расчетов необходимо учитывать, что если интенсивность разложения растительных остатков и годовой прирост фитомассы поддается экспериментальному определению, то микробное разложение ПОВ – процесс более длительный и трудно поддающийся прогнозу. Поэтому важную роль играет объективный выбор показателей гумусного состояния залежных почв, которые могут использоваться как надежные предикторы для пространственного моделирования эмиссии CO₂ после повторной распашки постагрогенных земель.

Цель работы – оценить в полевом эксперименте возможность использования различных показателей гумусного состояния залежных светло-серых лесных почв для пространственного прогноза масштабов эмиссии CO₂ в атмосферу при смене землепользования.

1. Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали массив постагрогенной светло-серой лесной почвы площадью 10.2 га. Залежь (возраст 20–25 лет) находится в стадии внедрения в луговой фитоценоз древесных пород, причем одновременно с травянистыми сообществами присутствовали и древесные, представленные мелколиственными и хвойными породами. Наличие хвойных пород на участке определяется близким соседством с сосновыми посадками. Полевым геоботаническим обследованием на участке были выделены 3 типа залежного растительного покрова: листовенная древесная растительность (березняк землянично-осоковый), хвойная древесная растительность (сосняк мертвопокровный), травянистая растительность (луг разнотравный, вейниково-мелколепестниковый). Массив залежи приурочен к одному элементу рельефа – слабополомому склону юго-восточной экспозиции.

Ранее с применением различных методов интерполяции для данного массива были созданы карты содержания ПОВ, плотности сложения и мощности старопахотного горизонта. По ним были сформированы итоговые карты пространственной вариабельности содержания в старопахотном горизонте общих и накопленных (в слое 0–15 см) запасов ПОВ. Методика создания карт пространственного варьирования запасов ПОВ описана в работе [14]. Установлено, что среднее содержание накопленного ПОВ в слое 0–15 см составило 9.9 т/га, что соответствует 21 % от общего запаса ПОВ (47.5 т/га). Накопленные запасы ПОВ на массиве залежи характеризуются высокой вариабельностью (размах варьирования составляет 8.0 т/га). По картам запасов ПОВ выделены три участка – с низким, средним и высоким содержанием ОБ в старопахотном горизонте.

На выбранных участках были организованы полевые опыты для изучения интенсивности эмиссии CO₂ и оценки изменения гумусного состояния старопахотного горизонта под влиянием условий, имитирующих возвращение залежей в пахотный оборот. Были заложены делянки квадратной формы (2 × 2 м) и распаханы на глубину 0–20 см с тщательной заделкой дернины и растительных остатков. С делянок регулярно убирали сорняки и производили рыхление верхнего слоя почвы (0–2 см) для предотвращения образования корки. На каждой делянке установили по 3 стационарных цилиндрических ПВХ-изолятора диаметром 110 см и длиной 15 см, направляющих потоки CO₂. Изоляторы обеспечивают измерение эмиссии CO₂ без нарушения строения пахотного слоя. В качестве контроля использовали прилегающие участки залежной растительности, на которых при минимальном нарушении корнеобитаемого слоя также установили ПВХ-изоляторы. Оценку почвенных потоков CO₂ осуществляли «камерным методом» по изменению концентрации CO₂ в цилиндрических ПВХ-камерах объемом 1.5 л и диаметром 110 мм, которые устанавливали на изоляторы, вмонтированные в верхний слой почвы. Измерения проводили с помощью портативного инфракрасного газоанализатора CD 210 (Wohler, Германия) со встроенным вентилятором для перемешивания воздуха в камере. Разрешение прибора составляло 1 ppm. Параллельно с определением содержания CO₂ в камере измеряли атмосферное давление и температуру приземного слоя воздуха и почвы на глубине 1 и 5 см с помощью портативного термометра Checktemp-1 (HANNA Instruments, Германия) с точностью до 0.1°C.

Для расчета изменения массы углерода углекислого газа (C-CO₂) в камере за время экспозиции использовали выражение, основанное на уравнении Менделеева–Клапейрона (1)

$$\Delta C = \frac{12 \times 10^{-6} \times \Delta M \times P \times V}{8.314(t + 273)}, \quad (1)$$

где ΔC – изменение содержания углерода в камере, г C-CO₂, 12 – молярная масса углерода, г/моль, 10⁻⁶ – коэффициент пересчета из ppm в объемные доли, 1/ppm, ΔM – изменение концентрации CO₂ в камере, ppm; P – атмосферное давление, Па, V – объем камеры, м³, 8.314 – универсальная газовая постоянная, (Па×м³)/(К×моль), t – температура воздуха, °C, 273 – параметр для пересчета температуры воздуха в К.

Результаты измерения пересчитывали в показатели интенсивности эмиссии CO₂ и выражали в г C-CO₂ с 1 м² площади почвы за 1 ч. Измерения проводили в трех повторностях. Полевые опыты были заложены в первой половине мая 2022 г., первое измерение было проведено через 7 дней после подготовки опытных участков, то есть после стабилизации состояния почвенной микрофлоры и потоков газов. Общая продолжительность эксперимента составила 2 вегетационных периода 2022–2023 гг.

Для оценки изменения гумусного состояния старопахотного горизонта получали смешанные образцы и определяли исходные значения показателей (сразу после распашки участка постановки опыта). Смешанные образцы составляли из десяти индивидуальных образцов, отобранных тростевым буром на всю глубину свежеспаханного горизонта. По той же схеме отбирали образцы для оценки изменения показателей гумусного состояния через 6, 12 и 18 мес с начала проведения полевого эксперимента. Определяли содержание общего углерода (C_{общ}) по методу Тюрина [30], содержание углерода, растворимого в кипящей воде (C_{кв}), по методике Коршенса–Шульца [31] и содержание углерода, растворимого в смеси Na₄P₂O₇-NaOH (C_{щел}), пиррофосфатным методом по Кононовой–Бельчиковой [32].

Результаты представляли в виде среднего значения параметра и стандартной ошибки среднего значения по выборке. Оценку разности средних значений показателей гумусного состояния проводили с использованием теста Стьюдента (*t*-критерий) для независимых выборок с оценкой равенства дисперсий по *F*-критерию Фишера. Для оценки значимости изменений содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{шел}}$ в ходе полевого эксперимента использовали однофакторный дисперсионный анализ. Статистические расчеты проводили в среде MS Excel (Microsoft Corp., США).

2. Результаты и их обсуждение

Результаты полевых измерений эмиссии CO₂ на распаханых участках (варианты опыта) и примыкающих к ним участках залежи (контроль) в течение вегетационного периода 2022 г. демонстрируют сильную изменчивость (табл. 1). В литературе варьирование показателей почвенного дыхания в течение вегетационного периода традиционно объясняется изменением температуры и влажности почвы, которые определяют скорость деструкции ОР и интенсивность выделения CO₂ из почвы [33–35]. В вегетационный период интенсивность эмиссии CO₂ из почвы может существенно увеличиваться и достигать значимых величин. Например, в работе Кургановой [36] интенсивность выделения CO₂ из почв под луговыми ценозами южной тайги в среднем составляла 100 мг С/(м²×ч), но при высоких температурах воздуха достигала значений 250–380 мг С/(м²×ч). Такого же порядка интенсивность выделения CO₂ в теплые месяцы получена в настоящей работе под залежной растительностью. Возрастание численности и биомассы различных групп микроорганизмов, сопровождающееся увеличением интенсивности дыхания в залежных почвах по сравнению с аналогичными пахотными почвами, отмечается в работах [37, 38]. Известно также, что годовая сумма почвенного дыхания под залежной растительностью может достигать исходного уровня, который был в ненарушенных естественных экосистемах, за то же время, что и восстановление запасов фитомассы, но значительно раньше, чем воссоздается запас ОР [39].

Ожидаемо низкие значения эмиссии CO₂ характерны для всех участков в начале и в конце вегетационного периода, а максимальная эмиссия достигается в середине вегетации. Резкое увеличение эмиссии CO₂ на опытном участке наблюдается в июле до 0.62–1.00 г С-CO₂/(м²×ч), что, скорее всего, связано с увеличением среднесуточных температур, приводящим к значительному усилению минерализации растительных остатков и части ОР на распаханых участках залежи. Вместе с тем средние значения эмиссии CO₂, рассчитанные за весь вегетационный период, подчиняются следующей закономерности: минимальная эмиссия на контрольной и опытных делянках характерна для участка с минимальным содержанием ОР, средняя – для участка со средним содержанием ОР и максимальная – для участка с наиболее высоким содержанием ОР. Поэтому можно сделать вывод, что эмиссия CO₂ как под залежами, так и после их распахки во многом определяется содержанием ОР в старопахотном горизонте. В целом выделение углекислого газа из распаханного старопахотного горизонта в 3.2–3.4 раза выше, чем под исходной растительностью.

Табл. 1. Интенсивность эмиссии CO₂ (г C-CO₂/(м²×ч)) на контрольных и опытных участках в течение вегетационных периодов 2022–2023 гг.
Table 1. CO₂ emission intensity (g C-CO₂/(m²×h)) of the control and experimental sites during the growing seasons of 2022–2023

Участок	Интенсивность эмиссии CO ₂ , г C-CO ₂ /(м ² ×ч)								Средняя эмиссия за вегетационный период, г C-CO ₂ /(м ² ×ч)
	Вторая половина мая	Первая половина июня	Вторая половина июня	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь		
Вегетационный период 2022 г.									
Участок с низким содержанием ПОВ	Контроль	0.031 ± 0.006	0.156 ± 0.005	0.079 ± 0.002	0.114 ± 0.004	0.218 ± 0.004	0.132 ± 0.004	0.039 ± 0.006	0.110
	Опыт	0.22 ± 0.02	0.38 ± 0.03	0.29 ± 0.05	0.62 ± 0.03	0.43 ± 0.05	0.31 ± 0.01	0.203 ± 0.008	0.351
Участок со средним содержанием ПОВ	Контроль	0.031 ± 0.008	0.156 ± 0.006	0.268 ± 0.006	0.20 ± 0.01	0.051 ± 0.007	0.065 ± 0.008	0.024 ± 0.003	0.114
	Опыт	0.21 ± 0.02	0.41 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.74 ± 0.04	0.32 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.383
Участок с высоким содержанием ПОВ	Контроль	0.050 ± 0.005	0.170 ± 0.008	0.13 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.193 ± 0.008	0.101 ± 0.004	0.031 ± 0.002	0.132
	Опыт	0.21 ± 0.02	0.41 ± 0.03	0.38 ± 0.02	1.00 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.434
Средняя температура почвы на глубине*									
Глубина	1 см	9.3	16.3	16.7	20.5	23.2	15.3	4.0	
	5 см	0.5	1.38	2.04	2.03	5.90	1.42	0.19	
Вегетационный период 2023 г.									
Участок с низким содержанием ПОВ	Контроль	0.15 ± 0.02	0.124 ± 0.009	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.097 ± 0.009	0.111
	Опыт	0.48 ± 0.06	0.18 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.41 ± 0.05	0.41 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.17 ± 0.03	0.285
Участок со средним содержанием ПОВ	Контроль	0.17 ± 0.01	0.14 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.063 ± 0.007	0.10 ± 0.02	0.022 ± 0.003	0.035 ± 0.007	0.091
	Опыт	0.66 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.25 ± 0.04	0.46 ± 0.06	0.35 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.107 ± 0.008	0.307
Участок с высоким содержанием ПОВ	Контроль	0.18 ± 0.02	0.115 ± 0.009	0.08 ± 0.01	0.079 ± 0.009	0.087 ± 0.008	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.093
	Опыт	0.661 ± 0.009	0.19 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.44 ± 0.04	0.43 ± 0.07	0.098 ± 0.006	0.17 ± 0.02	0.319
Средняя температура почвы на глубине*									
Глубина	1 см	21.8	17.9	19.7	23.3	18.2	16.7	14.6	
	5 см	2.87	2.64	4.22	3.95	2.84	1.07	4.04	
Примечание: * – среднее значение (в числителе) и стандартное отклонение (в знаменателе)									

На рис. 1 представлена динамика разности эмиссии CO₂ на опытных и контрольных участках в течение вегетационного периода 2022 г. Невысокие значения этого параметра наблюдаются в начале и конце вегетационного периода. Резкое увеличение происходит в июле, что, скорее всего, связано с увеличением интенсивности минерализации растительных остатков и накопленного под залежной растительностью ПОВ на распаханых участках вследствие повышения температуры старопашотного горизонта. Минимальная разница средней эмиссии между опытом и контролем за весь вегетационный период (0.241 г С-CO₂/(м²×ч)) характерна для участка с низким содержанием ПОВ, средняя (0.269 г С-CO₂/(м²×ч)) – для участка со средним содержанием ПОВ, а максимальная (0.302 г С-CO₂/(м²×ч)) – для участка с высоким содержанием ПОВ.

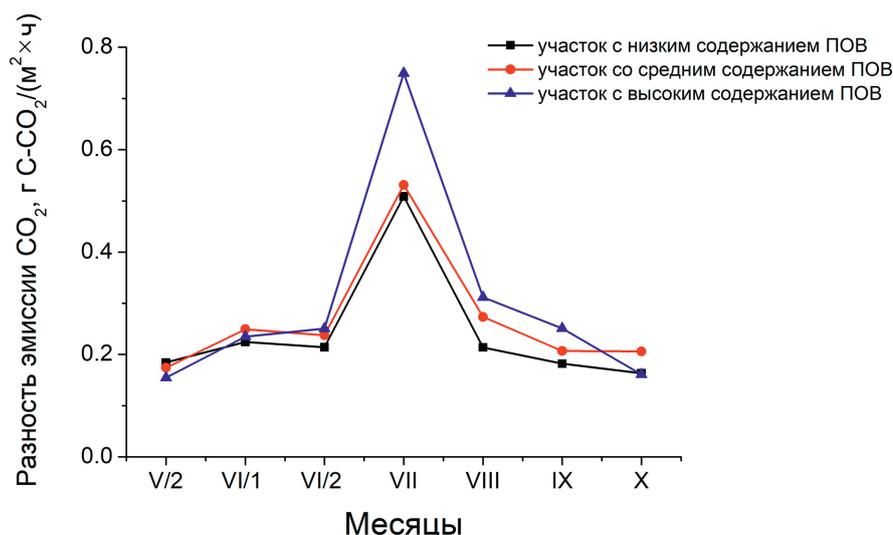


Рис. 1. Динамика разности интенсивности эмиссии CO₂ на опытных и контрольных участках с различным содержанием ПОВ по месяцам вегетационного периода 2022 г. (первый год полевого эксперимента, V/2 – вторая половина мая, VI/1 – первая половина июня, VI/2 – вторая половина июня, VII – июль, VIII – август, IX – сентябрь, X – октябрь)

Fig. 1. Monthly dynamics of the differences in CO₂ emission intensity between the experimental and control sites with various SOM levels during the growing season of 2022 (first year of the field experiment, V/2 – second half of May, VI/1 – first half of June, VI/2 – second half of June, VII – July, VIII – August, IX – September, X – October)

К концу первого вегетационного периода полевого эксперимента проведено предварительное определение содержания $C_{\text{общ}}$, $C_{\text{кв}}$ и $C_{\text{щел}}$. Сравнение с исходным состоянием показывает снижение содержание $C_{\text{общ}}$ в среднем на 3–4 %, однако это отличие статистически не значимо. Содержание $C_{\text{кв}}$, наоборот, увеличивается в среднем на 15–30 %, что, видимо, связано с новообразованием этой фракции ПОВ за счет разложения растительных остатков. Содержание углерода, экстрагируемого кипящей водой и другими «мягкими» растворителями, при формировании залежей растет по сравнению с таковым для пашни, но показатель является лабильным и в значительной мере может определяться поступлением в почву растительных остатков и обилием микробной биомассы [17]. Содержание $C_{\text{щел}}$ на распаханых участках к концу первого вегетационного периода в различных вариантах опыта уменьшается на 15–20 % по сравнению с исходным. Статистический анализ данных с применением t -теста независимых выборок показал значимость выявленных различий (при $p = 0.05$) в вариантах опыта, поставленных на участках со средним ($t = 3.67$ при $t_{\text{крит}} = 2.91$) и высоким ($t = 3.00$ при $t_{\text{крит}} = 2.13$) содержанием ПОВ. Для участка с низким содержанием ПОВ раз-

личие статистически не значимо ($t = 1.87$ при $t_{\text{крит}} = 2.13$). В дальнейшем в вариантах опыта проводили определение только $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{щел}}$ как наиболее перспективных и информативных показателей в аспекте оценки минерализации ПОВ при распашке залежей.

В течение вегетационного периода 2023 г. эмиссия CO₂ на контрольных и опытных участках изменяется статистически значимо (табл. 1). Высокие значения интенсивности эмиссии получены для мая, июля и августа, которые в 2023 г. характеризовались высокими положительными температурами, а низкие значения наблюдаются в июне, сентябре и октябре. Несмотря на существенные колебания эмиссии CO₂ из старопахотного горизонта, средние значения, рассчитанные на весь вегетационный период 2023 г., демонстрируют выраженную закономерность, заключающуюся в более высокой эмиссии CO₂ (в 2.6–3.3 раза) на опытных участках по сравнению с контрольными. В целом интенсивность выделения CO₂ из распаханного участка залежи за вегетационный период 2023 г. снижается на 20–30 % по сравнению с вегетационным периодом 2022 г. При этом сохраняется прямая зависимость средних значений интенсивности от исходного содержания ПОВ (табл. 1).

На рис. 2 представлен график изменения разности эмиссии CO₂ на опытных и контрольных участках в течение вегетационного периода 2023 г. Максимальная разница проявляется в мае, июле и августе, а минимальная – в июне, сентябре и октябре при выраженном снижении температуры почвы. В 2023 г., как и 2022 г. проявляется общая закономерность: минимальная разница величин средней эмиссии CO₂ за весь вегетационный период на опытных и контрольных участках достигается в случае низкого содержания ПОВ (0.174 г C-CO₂/(м²×ч)), среднее значение разности – при среднем содержании ПОВ (0.216 г C-CO₂/(м²×ч)) и максимальное – при высоком содержании ПОВ (0.226 г C-CO₂/(м²×ч)). Средняя разность эмиссии между опытом и контролем снижается на второй год проведения эксперимента на 20–30 % по сравнению с первым годом, но все же остается достаточно высокой.

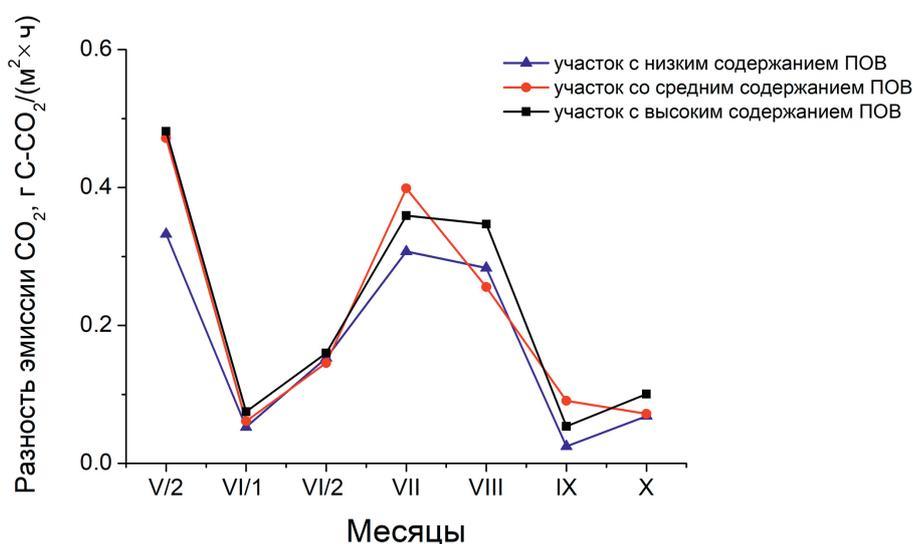


Рис. 2. Динамика разности интенсивности эмиссии CO₂ на опытных и контрольных участках с различным содержанием ПОВ по месяцам вегетационного периода 2023 г. (второй год полевого эксперимента, V/2 – вторая половина мая, VI/1 – первая половина июня, VI/2 – вторая половина июня, VII – июль, VIII – август, IX – сентябрь, X – октябрь)

Fig. 2. Monthly dynamics of the differences in CO₂ emission intensity between the experimental and control sites with various SOM levels during the growing season of 2023 (second year of the field experiment, V/2 – second half of May, VI/1 – first half of June, VI/2 – second half of June, VII – July, VIII – August, IX – September, X – October)

Через 12 и 18 месяцев от начала полевого эксперимента изучены изменения содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{щел}}$ в результате распашки залежи (табл. 2), а также проведена оценка их статистической значимости.

Табл. 2. Изменение содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{щел}}$ в полевом эксперименте длительностью 6, 12 и 18 месяцев по сравнению с исходным состоянием ($n = 3$)

Table 2. C_{tot} and C_{alk} changes during the field experiment that lasted 6, 12, and 18 months as compared to the initial state ($n = 3$)

Тип участка	Длительность опыта, мес.	$C_{\text{общ}}, \%$	$C_{\text{щел}}, \%$
Участок с низким содержанием ПОВ	0 (исходное состояние)	0.84 ± 0.07	0.41 ± 0.04
	6	0.81 ± 0.07	0.04 ± 0.03
	12	0.81 ± 0.03	0.03 ± 0.03
	18	0.80 ± 0.02	0.03 ± 0.02
Участок со средним содержанием ПОВ	0 (исходное состояние)	1.01 ± 0.08	0.45 ± 0.05
	6	0.97 ± 0.09	0.37 ± 0.01
	12	0.97 ± 0.04	0.35 ± 0.03
	18	0.95 ± 0.04	0.35 ± 0.02
Участок с высоким содержанием ПОВ	0 (исходное состояние)	1.3 ± 0.1	0.51 ± 0.05
	6	1.25 ± 0.08	0.40 ± 0.04
	12	1.21 ± 0.08	0.40 ± 0.03
	18	1.19 ± 0.06	0.38 ± 0.03

Анализ данных показывает снижение содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{щел}}$ в течение всех 18 мес., что в целом согласуется с результатами полевого определения интенсивности эмиссии CO₂ из старопахотного горизонта. Показано, что через 18 мес. после распашки залежей снижение содержания $C_{\text{общ}}$ по отношению к исходному составляет 4.8 % для участка с низким содержанием ПОВ, 6.0 % для участка со средним содержанием ПОВ и 8.5 % для участка с высоким содержанием ПОВ. Однако по данным однофакторного дисперсионного анализа различие статистически незначимо для всех вариантов (табл. 3).

Табл. 3. Результаты однофакторного дисперсионного анализа данных по изменению содержания $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{щел}}$ в различных вариантах полевого эксперимента длительностью 6, 12 и 18 месяцев по сравнению с исходным состоянием (* – различие статистически значимо)

Table 3. One-way ANOVA results for the C_{tot} and C_{alk} changes in various variants of the field experiment that lasted 6, 12, and 18 months as compared to the initial state (* – statistically significant difference)

Варианты полевого эксперимента	F -критерий			
	$C_{\text{общ}}, 6,12$ мес ($F_{\text{крит}} = 5.14$)	$C_{\text{общ}}, 6,12$ и 18 мес ($F_{\text{крит}} = 4.07$)	$C_{\text{щел}}, 6,12$ мес ($F_{\text{крит}} = 5.14$)	$C_{\text{щел}}, 6,12$ и 18 мес ($F_{\text{крит}} = 4.07$)
Почва с низким содержанием ПОВ	0.16	0.21	3.21	3.14
Почва со средним содержанием ПОВ	0.21	0.26	5.43*	4.79*
Почва с высоким содержанием ПОВ	0.37	0.42	7.16*	6.15*

Уменьшение содержания $C_{\text{щел}}$ по сравнению с исходным уровнем достигает 21.9, 22.2 и 25.5 % на участках с низким, средним и высоким содержаниями ПОВ соответственно. При этом различие в $C_{\text{щел}}$ для полевого опыта и исходного состояния на участках со средним и высоким содержанием ПОВ является статистически значимым (табл. 3).

В результате проведения полевого эксперимента в течение двух вегетационных периодов показано, что эмиссия CO₂ на распаханых участках заметно выше, чем на прилегающих залежных участках. Она зависит от исходного содержания ПОВ и сопровождается статистически значимым уменьшением содержания $C_{\text{щел}}$ при достаточно высоком уровне накопления запасов ПОВ. Проведенный эксперимент не предполагал отдельную оценку потоков CO₂ из распаханной залежной почвы, образующихся за счет разложения растительных остатков и минерализации ПОВ, поскольку реализация такого подхода в полевых опытах представляется чрезвычайно трудной, а, возможно, в определенной степени и нерешаемой задачей. По мнению некоторых авторов [37], разделение источников эмиссии CO₂ из почв по показателю базального дыхания является более перспективным при проведении лабораторных инкубационных опытов с удалением и без удаления корневой массы. Вместе с тем признание наличия прямых и обратных связей между содержанием ПОВ и показателями обилия фитоценозов постулируется для большинства концептуальных моделей, ориентированных на оценку динамики ОБ в почвах [40, 41]. В работе [25] показано наличие тесной корреляции ($r = 0.91$, $p = 0.01$) между содержанием сухого вещества корней и растительных остатков под залежами и запасом ПОВ в слое (0–10 см) старопахотного горизонта. Наличие подобных связей позволяет допустить, что оптимально подобранные показатели гумусного состояния могут быть использованы при построении прогнозных пространственных моделей эмиссии CO₂ не только в качестве прямых предикторов, отражающих потенциальную подверженность ПОВ залежей минерализации при распашке, но и как косвенных предикторов, отражающих потоки углекислого газа, поступающего в атмосферу за счет минерализации растительных остатков.

Заключение

В ходе проведения полевого эксперимента, моделирующего распашку постагrogenных почв, показано, что эмиссия CO₂ в первый и второй вегетационные периоды выше (в 3.2–3.4 и 2.6–3.3 раза соответственно), чем под нетронутой залежной растительностью. Выявлено, что интенсивность эмиссии CO₂ в значительной степени определяется содержанием ПОВ. Разница средней эмиссии для опытных и контрольных участков за первый вегетационный период (2022 г.) увеличивается с ростом содержания ПОВ. Во второй вегетационный период (2023 г.) эта тенденция сохраняется несмотря на то, что средняя разница эмиссии CO₂ уменьшается на 20–30 % по сравнению с первым годом. Установлено статистически значимое снижение содержания $C_{\text{щел}}$ после распашки залежи относительно исходного (22.2 и 25.5 % для участков со средним и высоким содержанием ПОВ). Результаты проведенного полевого эксперимента показали, что содержание $C_{\text{щел}}$ может оцениваться как наиболее перспективный показатель гумусного состояния старопахотного горизонта постагrogenных почв, который может использоваться для построения прогнозных моделей эмиссии CO₂ в атмосферу при распашке залежных земель, но только при достаточно высоких запасах ПОВ, накопленных за постагrogenную эволюцию.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Li S., Li X. Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects // J. Geogr. Sci. 2017. V. 27, No 1. P. 1123–1150. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1426-0>.
2. Ustaoglu E., Collier M.J. Farmland abandonment in Europe: An overview of drivers, consequences, and assessment of the sustainability implications // Environ. Rev. 2018. V. 26, No 4. P. 396–416. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0001>.
3. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: Геос, 2010. 416 с.
4. Иванов А.Л., Завалин А.А., Кузнецов М.С., Захаренко В.А., Свинцов И.П., Карпучин А.И., Исаев В.А., Гулюк Г.Г., Чекмарев П.А., Ефанов П.А., Кирюшин В.И., Хитров Н.Б., Каиштанов А.Н., Апарин Б.Ф., Карманов И.И., Булгаков Д.С., Молчанов Э.Н., Рожков В.А., Симакова М.С., Рухович Д.И., Любимова И.Н., Назарова Л.Ф., Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Шубина О.А., Прудников П.В., Новиков А.А., Титов И.Е., Кизяев Б.М., Кирейчева Л.В., Ковалев Н.Г., Сычев В.Г., Лунев М.И., Павлихина А.В., Еськов А.И., Тарасов С.И., Черкасов Г.Н., Масютенко Н.П., Кулик К.Н., Сизов О.А., Косолапов В.М., Кутузова А.Н., Добровольский Г.В., Шоба С.А., Урусевская И.С., Алябина И.О., Карпова Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Волков С.Н., Вершинин В.В., Варламов А.А., Лойко П.Ф., Миндрин А.С., Сапожников П.Н., Оглезнев А.К., Сорокина О.А., Федоренко В.Ф. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель, выбывших из активного сельскохозяйственного производства / под ред. Романенко Г.А. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 64 с.
5. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Швиденко А.З., Сапожников П.М. Изменение общего пула органического углерода в залежных почвах России в 1990–2004 гг. // Почвоведение. 2010. № 3. С. 361–368.
6. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Largescale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. V. 133. P. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>.
7. Kudryarov V.N. Soil-biogeochemical aspects of arable farming in the Russian Federation // Eurasian Soil Sci. 2019. V. 52, No 1. P. 94–104. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010095>.
8. Некрич А.С., Люри Д.И. Изменения динамики аграрных угодий России в 1990–2014 гг. // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 3. С. 64–77. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019364-77>.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации». URL: <http://base.garant.ru/400773886/>
10. Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F. Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data // Environ. Res. Lett. 2013. V. 8, No 3. Art. 035035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035035>.
11. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: A meta analysis // Global Change Biol. 2002. V. 8, No 4. P. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.
12. Mueller C.W., Koegel-Knabner I. Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites // Biol. Fertil. Soils. 2009. V. 45, No 4. P. 347–359. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0336-9>.
13. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>.
14. Гиниятуллин К.Г., Рязанов, Смирнова Е.В., Латыпова Л.И., Рыжих Л.Ю. Использование геоэкологических методов для оценки запасов органического вещества в залежных почвах // Ученые

- записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2019. Т. 161, кн. 2. С. 275–292. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.275-292>.
15. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Караванова Е.И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030102>.
 16. Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт Н., Пардини Д. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282–292.
 17. Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргунов Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14110045>.
 18. Giniyatullin K.G., Smirnova E.V., Ryzhikh L.Yu., Latipova L.I. Spectral characteristics of water-soluble and alkaline-soluble organic substance of fallow light-gray forest soils // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 315, No 5. Art. 052021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052021>.
 19. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>.
 20. Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Окунев Р.В., Кадырова Р.Г., Рыжих Л.Ю. Изучение в длительном лабораторном инкубационном эксперименте потенциальной подверженности минерализации органического вещества постагрогенных светло-серых почв // Аграрная наука. 2024. Вып. 1. С. 97–101. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-97-101>.
 21. Ioffe G., Nefedova T., Kirsten D.B. Land abandonment in Russia // Eurasian Geogr. Econ. 2012. V. 53, No 4. P. 527–549. <https://doi.org/10.2747/1539-7216.53.4.527>.
 22. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sens. Environ. 2015. V. 159. P. 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>.
 23. Goga T., Feranec J., Bucha T., Rusnák M., Sačkov I., Barka I., Kopecká M., Papčo J., Ot'ahel' J., Szatmári D., Pazúr R., Sedliak M., Pajtík J., Vladovič J. A review of the application of remote sensing data for abandoned agricultural land identification with focus on Central and Eastern Europe // Remote Sens. 2019. V. 11, No 23. Art. 2759. <https://doi.org/10.3390/rs11232759>.
 24. Ershov D.V., Gavrilyuk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A.V., Tikhonov G.N. Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-Soviet period: A comparative Landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus // Remote Sens. 2022. V. 14, No 2. Art. 322. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>.
 25. Giniyatullin K.G., Sahabiev I.A., Ryazanov S.S., Smirnova E.V., Tishin D.V., Latypova K.I. Possibility of using zoning of fallow vegetation by vegetation indices to assess organic matter accumulation in postagrogenic soils // Eurasian Soil Sci. 2023. V. 56, No 8. P. 1130–1138. <https://doi.org/10.1134/S1064229323600951>.
 26. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // Sci. Data. 2018. V. 5. Art. 180056. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.
 27. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Кузяков Я., Келлер Т., Ланге Ш. Баланс углерода в почвах залежей Подмосковья // Почвоведение. 2007. № 1. С. 60–68.
 28. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрехимия. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>.
 29. Кудеяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011–1022. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>.

30. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Издательство стандартов, 1992. 7 с.
31. Шульц Е., Деннер Б., Хоффман Г. Метод определения углерода и азота, экстрагируемых горячей водой // Методы исследования органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2005. С. 230–240.
32. Кононова М.М., Бельчикова Н.П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. 1961. № 10. С. 75–87.
33. Lomander A., Kätterer T., Andrén O. Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuation temperature // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30, No 14. P. 2017–2022. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00076-5).
34. Kurganova I., Lopes De Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Zhmurin V. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: The synthesis of a 24-year continuous observation // Forests. 2022. V. 13, No 9. Art. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>.
35. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Мякишина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Аблеева В.А. Температурная чувствительность дыхания почв луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1059–1076. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600476>.
36. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Москва, 2010. 48 с.
37. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольников Е.В. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуоксида углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.
38. Полянская Л.М., Суханова Н.И., Чакмазян К.В., Звягинцев Д.Г. Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи // Почвоведение. 2012. № 7. С. 792–798.
39. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменения запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580–594. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>.
40. Росновский И.Н. Системный анализ и математическое моделирование процессов в почвах. Томск: Томский государственный университет, 2007. 312 с.
41. Шейн Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении. М.: ИП Маракушев А.Б., 2016. 377 с.

References

1. Li S., Li X. Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects. *J. Geogr. Sci.*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 1123–1150. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1426-0>.
2. Ustaoglu E., Collier M.J. Farmland abandonment in Europe: An overview of drivers, consequences, and assessment of the sustainability implications. *Environ. Rev.*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 396–416. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0001>.
3. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX v. i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of Agricultural Lands in Russia in the 20th century and Post-Agrogenic Restoration of Vegetation and Soils]. Moscow, Geos, 2010. 416 p. (In Russian)
4. Ivanov A.L., Zavalin A.A., Kuznetsov M.S., Zakharenko V.A., Svintsov I.P., Karpukhin A.I., Isaev V.A., Gulyuk G.G., Chekmarev P.A., Efanov P.A., Kiryushin V.I., Khitrov N.B., Kashtanov A.N., Aparin B.F., Karmanov I.I., Bulgakov D.S., Molchanov E.N., Rozhkov V.A., Simakova M.S., Rukhovich D.I., Lyubimova I.N., Nazarova L.F., Aleksakhin R.M., Sanzharova N.I., Shubina O.A., Prudnikov P.V., Novikov A.A., Titov I.E., Kizyaev B.M., Kireicheva L.V., Kovalev N.G., Sychev V.G., Lunev M.I.,

- Pavlikhina A.V., Es'kov A.I., Tarasov S.I., Cherkasov G.N., Masyutenko N.P., Kulik K.N., Sizov O.A., Kosolapov V.M., Kutuzova A.N., Dobrovolskii G.V., Shoba S.A., Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Karpova D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Volkov S.N., Vershinin V.V., Varlamov A.A., Loiko P.F., Mindrin A.S., Sapozhnikov P.N., Ogleznev A.K., Sorokina O.A., Fedorenko V.F. *Agroekologicheskoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya zemel', vybyvshikh iz aktivnogo sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva* [Agroecological State and Prospects for the Use of Lands Abandoned for Active Agricultural Production]. Romanenko G.A. (Ed.). Moscow, FGNU "Rosinformagrotekh", 2008. 64 p. (In Russian)
5. Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Shvidenko A.Z., Sapozhnikov P.M. Changes in the organic carbon pool of abandoned soils in Russia (1990–2004). *Eurasian Soil Sci.*, 2010, vol. 43, no. 3, pp. 333–340. <https://doi.org/10.1134/S1064229310030129>.
 6. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Largescale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan. *Catena*, 2015, vol. 133, pp. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>.
 7. Kudryarov V.N. Soil-biogeochemical aspects of arable farming in the Russian Federation. *Eurasian Soil Sci.*, 2019, vol. 52, no. 1, pp. 94–104. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010095>.
 8. Nekrich A.S., Lyuri D.I. Changes in the dynamics of agricultural lands in Russia in 1990–2014. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 64–77. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019364-77>. (In Russian)
 9. Resolution of the Government of the Russian Federation of May 14, 2021 no. 731 "On the State Program for the Effective Involvement of Agricultural Lands into Circulation and the Development of the Land Reclamation Complex of the Russian Federation". URL: <http://base.garant.ru/400773886/>. (In Russian)
 10. Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F. Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data. *Environ. Res. Lett.*, 2013, vol. 8, no. 3, art. 035035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035035>.
 11. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: A meta analysis. *Global Change Biol.*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.
 12. Mueller C.W., Koegel-Knabner I. Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites. *Biol. Fertil. Soils*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 347–359. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0336-9>.
 13. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools. *Geoderma*, 2013, vols. 207–208, pp. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>.
 14. Giniyatullin K.G., Ryazanov S.S., Smirnova E.V., Latypova L.I., Ryzhikh L.Yu. Using geostatistical methods for evaluating organic matter reserves in fallow soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2019, vol. 161, no. 2, pp. 275–292. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.275-292>. (In Russian)
 15. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols in southern taiga during the postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Sci.*, 2021, vol. 54, no. 3, pp. 337–351. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>.
 16. Semenov B.M., Kravchenko I.K., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Gispert M., Pardini J. Experimental determination of the active organic matter content in some soils of natural and agricultural ecosystems. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 3, pp. 251–260. <https://doi.org/10.1134/S1064229306030033>.
 17. Erokhova A.A., Makarov M.I., Morgun E.G., Ryzhova I.M. Effect of the natural reforestation of an arable land on the organic matter composition in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2014, vol. 47, no. 11, pp. 1100–1106. <https://doi.org/10.1134/S1064229314110040>.

18. Giniyatullin K.G., Smirnova E.V., Ryzhikh L.Yu., Latipova L.I. Spectral characteristics of water-soluble and alkaline-soluble organic substance of fallow light-gray forest soils. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 315, no. 5, art. 052021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052021>.
19. Kudiyarov V.N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 9, pp. 923–933. <https://doi.org/10.1134/S1064229315090070>.
20. Giniyatullin K.G., Sakhabiev I.A., Okunev R.V., Kadyrova R.G., Ryzhikh L.Yu. Study in a long-term laboratory experiment of the potential susceptibility to mineralization of organic matter in post-agrogenic light gray soils. *Agrar. Sci.*, 2024, no. 1, pp. 97–101. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-97-101>. (In Russian)
21. Ioffe G., Nefedova T., Kirsten D.B. Land abandonment in Russia. *Eurasian Geogr. Econ.*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 527–549. <https://doi.org/10.2747/1539-7216.53.4.527>.
22. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sens. Environ.*, 2015, vol. 159, pp. 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>.
23. Goga T., Feranec J., Bucha T., Rusnák M., Sačkov I., Barka I., Kopecká M., Papčo J., Ot'ahel' J., Szatmári D., Pazúr R., Sedliak M., Pajtík J., Vladovič J. A review of the application of remote sensing data for abandoned agricultural land identification with focus on Central and Eastern Europe. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 23, art. 2759. <https://doi.org/10.3390/rs11232759>.
24. Ershov D.V., Gavrilyuk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A.V., Tikhonov G.N. Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-Soviet period: A comparative Landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, no. 2, art. 322. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>.
25. Giniyatullin K.G., Sahabiev I.A., Ryazanov S.S., Smirnova E.V., Tishin D.V., Latypova K.I. Possibility of using zoning of fallow vegetation by vegetation indices to assess organic matter accumulation in postagrogenic soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2023, vol. 56, no. 8, pp. 1130–1138. <https://doi.org/10.1134/S1064229323600951>.
26. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Sci. Data*, 2018, vol. 5, art. 180056. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.
27. Kurganova I.N., Yermolaev A.M., Lopes de Gerenyu V.O., Larionova A.A., Kuzyakov Ya., Keller T., Lange S. Carbon balance in the soils of abandoned lands in Moscow region. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1134/S1064229307010085>.
28. Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'eva Z.S., Danchenko N.N. Humus depletion and soil carbon sequestration. *Agrokimiya*, 2021, no. 5, pp. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>. (In Russian)
29. Kudiyarov V.N. Soil respiration and carbon sequestration: A review. *Eurasian Soil Sci.*, 2023, vol. 56, no. 9, pp. 1191–1200. <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>.
30. State Standard 26213-91. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow, Izd. Stand., 1992. 7 p. (In Russian)
31. Schultz E., Denner B., Hoffman G. Method for determination of carbon and nitrogen extractable by hot water. In: *Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva pochvy* [Methods of Studying Soil Organic Matter]. Moscow, Rossel'khozakademiya – GNU BNIPTIOU, 2005, pp. 230–240. (In Russian)
32. Kononova M.M., Bel'chikova N.P. Accelerated methods for determining the composition of humus in mineral soils. *Pochvovedenie*, 1961, no. 10, pp. 75–87. (In Russian)

33. Lomander A., Kätterer T., Andrén O. Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuation temperature. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, vol. 30, no. 14, pp. 2017–2022. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00076-5).
34. Kurganova I., Lopes De Gerenyu V., Khoroshaev D., Myakshina T., Saprnov D., Zhmurin V. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: The synthesis of a 24-year continuous observation. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 9, art. 1374. <https://doi.org/10.3390/f13091374>.
35. Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Saprnov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A. Temperature sensitivity of soil respiration in grasslands in temperate continental climate zone: Analysis of 25-year-long monitoring data. *Eurasian Soil Sci.*, 2023, vol. 56, no. 9, pp. 1232–1246. <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>.
36. Kurganova I.N. Emission and balance of carbon dioxide in terrestrial ecosystems of Russia. *Extended Abstract of Dr. Sci. (Biology) Diss.* Moscow, 2010. 48 p. (In Russian)
37. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Ryzhova I.M., Bocharnikova E.O., Stolnikova E.V. Microbial biomass carbon and the microbial carbon dioxide production by soddy-podzolic soils in postagrogenic biogeocenoses and in native spruce forests of the southern taiga (Kostroma oblast). *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 9, pp. 1029–1037. <https://doi.org/10.1134/S1064229309090105>.
38. Polyanskaya L.M., Sukhanova N.I., Chakmazyan K.V., Zvyagintsev D.G. Changes in the structure of soil microbial biomass under fallow. *Eurasian Soil Sci.*, 2012, vol. 45, no. 7, pp. 710–716. <https://doi.org/10.1134/S1064229312030088>.
39. Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenu V.O., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I. Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, vol. 50, no. 5, pp. 559–572. <https://doi.org/10.1134/S1064229317050076>.
40. Rosnovskii I.N. *Sistemnyi analiz i matematicheskoe modelirovanie protsessov v pochvakh* [Systems Analysis and Mathematical Modeling of Processes in Soils]. Tomsk, Tomsk. Gos. Univ., 2007. 312 p. (In Russian)
41. Shein E.V., Ryzhova I.M. *Matematicheskoe modelirovanie v pochvovedenii* [Mathematical Modeling in Soil Science]. Moscow, IP Marakushev A.B., 2016. 377 p. (In Russian)

Информация об авторах

Камиль Гашикович Гиниятуллин, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения имени И.В. Тюрина Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: giniyatullin@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4102-2209>

Ильназ Алимович Сахабиев, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения имени И.В. Тюрина Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: ilnasoil@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4339-9704>

Елена Васильевна Смирнова, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения имени И.В. Тюрина Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: elenavsmirnova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3081-7615>

Денис Владимирович Тишин, кандидат биологических наук, доцент кафедры общей экологии Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: denis.tishin@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4790-2840>

Татьяна Алексеевна Макарова, аспирант кафедры почвоведения имени И.В. Тюрина Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: t.deni1797@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4905>

Author Information

Kamil G. Giniyatullin, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Soil Science, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan Federal University

E-mail: giniyatullin@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4102-2209>

Ilnas A. Sahabiev, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Soil Science, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan Federal University

E-mail: ilnassoil@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4339-9704>

Elena V. Smirnova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of Department of Soil Science, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan Federal University

E-mail: elenavsmirnova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3081-7615>

Denis V. Tishin, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of General Ecology, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan Federal University

E-mail: denis.tishin@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4790-2840>

Tatyana A. Makarova, Postgraduate Student, Department of Soil Science, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan Federal University

E-mail: t.deni1797@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4905>

Поступила в редакцию 23.12.2024

Принята к публикации 31.03.2025

Received December 23, 2024

Accepted March 31, 2025