

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.261>

Пространственно-временной анализ почвенных показателей углеродного цикла в постагрогенных экосистемах южного Подмосковья

© 2024 А. И. Романова , В. А. Маханцева , Т. Ю. Волкова , Т. Н. Лебедева ,
А. И. Журавлева , Е. С. Митрохина , И. Н. Курганова , К. В. Иващенко 

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, д. 2, корпус 2, г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия. E-mail: gavrisheva.ast@gmail.com

Цель исследования. Анализ пространственно-временного изменения содержания, запасов общего углерода (С) и углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$), скорости базального дыхания (БД), доступности органического вещества для микробного разложения (БД:С) в пахотных и постагрогенных серых почвах южного Подмосковья.

Место и время проведения. Московская область, г. Пушкино, опытно-полевая станция Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, июнь 2023 г.

Методы. Исследования проводили на почвах разного типа землепользования: пашня, залежь под луговой растительностью и залежь под молодым берёзовым лесом. Для каждого типа землепользования были выполнены геоботанические описания и отобраны почвенные образцы из верхней части профиля (0–30 см с шагом 5 см) в четырёх пространственно-удалённых точках. В почвенных образцах определили содержание и запасы С и $C_{\text{мик}}$, отношение С:N, скорость БД и доступность органического вещества для микробного разложения (БД:С).

Основные результаты. После 9 лет параллельного функционирования агроценоза и постагрогенных экосистем максимальные запасы общего углерода в почвенном слое 0–30 см характерны для залежи под молодым берёзовым лесом (72 т С га^{-1}), а минимальные (45 т С га^{-1}) – для пашни. Актуальная скорость накопления общего углерода в почвах залежей может составлять $0,9$ и $2,4 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ для лугового разнотравья и молодого леса, соответственно. Соотношение С:N в почвах залежей за 9-летний период увеличилось в 1,2–1,5 раза в слое 0–5 см. С глубиной отношение С:N снижалось. Отмечено уменьшение скорости базального дыхания почвы в слое 0–10 см в ряду: залежь под луговым разнотравьем > залежь под молодым берёзовым лесом > пашня. Выявлена тенденция увеличения БД:С в верхнем слое (0–5 см) почв пашни и залежи под луговым разнотравьем в 1,2 раза за наблюдаемый период (от 49 до $60 \text{ мкг С г}^{-1} \text{ С ч}^{-1}$ и от 52 до $67 \text{ мкг С г}^{-1} \text{ С ч}^{-1}$, соответственно). Для залежи под молодым берёзовым лесом показана обратная тенденция – уменьшение БД:С в 1,9 раза (от 74 до $39 \text{ мкг С г}^{-1} \text{ С ч}^{-1}$).

Заключение. Конверсия пахотных почв в залежи, занятые луговой или молодой лесной растительностью, как в хроноряду, так и во времени приводит к накоплению общего углерода, что наиболее заметно в верхней части почвенного профиля (слой 0–5 см).

Ключевые слова: пашня; залежь; запасы углерода; запасы микробной биомассы, базальное дыхание.

Цитирование: Романова А.И., Маханцева В.А., Волкова Т.Ю., Лебедева Т.Н., Журавлева А.И., Митрохина Е.С., Курганова И.Н., Иващенко К.В. Пространственно-временной анализ почвенных показателей углеродного цикла в постагрогенных экосистемах южного Подмосковья // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 3. e261. DOI: [10.31251/pos.v7i3.261](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.261).

ВВЕДЕНИЕ

Площадь сельскохозяйственных угодий в России существенно сократилась в результате экономического кризиса 1990-х годов. Данные Росстата (https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy2024) указывают на сокращение посевных площадей с 1990 года (117,7 млн га) по 2023 год (81,2 млн га) примерно на 36,5 млн га. В настоящее время на большей части этих территорий происходит восстановление естественных экосистем, сопровождающееся изменением состава растительности, характера почвообразования и свойств почв (Люри и др., 2010; Zhang et al., 2024). При зарастании заброшенных сельскохозяйственных угодий, особенно после их длительного использования, существенно изменяются основные физические, химические и биологические свойства верхних горизонтов почвы (Телеснина, Жуков, 2019; Falkengren-Grerup et al., 2005; Cramer et al., 2008). Характер изменения содержания **органического вещества (ОВ)** в почвах в процессе их постагрогенного развития представляет большой интерес для отечественных и зарубежных исследователей (Тейт, 1991; Телеснина и др., 2017; Рыжова и др., 2020; Tisdall, Oades, 1982; Vesterdal et al., 2002; Kurganova, Lopes

de Gerenyu, 2008; Poeplau et al., 2011; Kalinina et al., 2013). В некоторых работах выявлено, что с увеличением периода отсутствия сельскохозяйственной нагрузки содержание **общего углерода (С)** в почве увеличивается (Телеснина и др., 2017; Kurganova, Lopes de Gerenyu, 2008; Kalinina et al., 2015; Post, Kwon, 2000). Другие исследователи показали, что содержание С в залежных почвах может изменяться незначительно (Kalinina et al., 2013) или даже снижаться (Vesterdal et al., 2002). На скорость изменения запасов С влияют многие факторы, такие как климатические условия, тип и свойства почвы, а также история землепользования.

Тип растительности оказывает весьма существенное влияние на ряд физико-химических свойств почвы и её биологическую активность (Казакова и др., 2018; Копчик и др., 2018; Лукина и др., 2019). При зарастании бывших агрогенных почв свойства их верхнего старопашотного слоя максимально изменяются (Макаров, 1981; Falkengren-Grerup et al., 2005). В процессе постагрогенного развития быстрее всего восстанавливаются такие почвенные свойства, как кислотность и содержание обменных оснований (Kalinina et al., 2009).

В условиях глобального изменения климата крайне востребована оценка секвестрации С в результате восстановления зональных природных экосистем на залежных землях. По оценкам И.Н. Кургановой с соавторами (Kurganova et al., 2015) общее накопление С в постагрогенных экосистемах на всей территории России в первые 20 лет после вывода почв из сельскохозяйственного использования составляет в среднем 155 ± 27 млн т С год⁻¹, при этом средняя скорость секвестрации углерода в этот период оценивается в $1,05 \pm 10$ т С га⁻¹ год⁻¹ (Kurganova et al., 2014). Важно отметить, что такие оценки основаны на сравнительной характеристике запасов С в почвах постагрогенных экосистем с таковыми на современных пашнях. Однако при оценке скоростей накопления С в постагрогенных почвах не учитываются скорости изменения запасов С на пашнях. Следовательно, пространственно-временной анализ показателей почвенного цикла С в постагрогенных и пахотных почвах позволит более корректно оценить актуальные скорости изменений запасов С.

Цель работы – анализ пространственно-временного изменения содержания, запасов общего углерода (С) и углерода микробной биомассы (Смик), скорости базального дыхания (БД), доступности органического вещества для микробного разложения (БД:С) в пахотных и постагрогенных серых почвах южного Подмосковья спустя 9 лет их функционирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на территории опытно-полевой станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино Московской обл., 54°49' с. ш.; 37°34' в. д.), на которой располагалась пахотная и постагрогенные экосистемы, выведенные из сельскохозяйственного оборота в 2004 и 2008 г. (рис. 1). По многолетним данным метеостанции комплексного фонового мониторинга п. Данки (Серпуховский р-н Московской обл.), среднегодовая температура воздуха \pm стандартная ошибка (SE) в 1991–2020 гг. в районе исследований составила $5,7 \pm 0,1$ °С, а средняя многолетняя годовая сумма осадков (\pm SE) – 640 ± 20 мм. Температуры июля и января (\pm SE) за этот же период составляют $18,8 \pm 0,3$ и $-7,2 \pm 0,6$ °С, соответственно. Постоянный снежный покров в разные годы образуется в регионе, начиная с ноября до середины января, и держится, как правило, до середины апреля (Курганова и др., 2023).



Рисунок 1. Расположение объектов исследования.

Для изучения растительного сообщества в каждой экосистеме закладывали геоботаническую площадку размером 10×10 м, на которой оценивали общее проективное покрытие растительности и видовой состав высших сосудистых растений. Определение таксонов и их анализ проводили по П.Ф. Маевскому (2014). Для площадки со сформированным древесным ярусом (залежь 2004 г.) дополнительно проводили сплошной пересчет деревьев с диаметром ствола более 8 см на высоте 1,3 м и/или высотой более 6 м, с указанием видовой принадлежности, высоты, диаметра на высоте 1,3 м. На пашне геоботанические исследования не проводили ввиду нестабильности биоразнообразия, связанного с режимом землепользования (зерно-паровой севооборот).

Отбор почвенных образцов и пробоподготовка. Объекты исследования расположены в зоне распространения серых почв (зона широколиственных лесов). Дизайн отбора образцов почвы в 2023 г. соответствовал пробоотбору 2014 года (Овсепян, 2018). В каждой экосистеме была выбрана площадка 100 м² с наиболее типичной растительностью, на которой методом «конверта» в пяти пространственно-удалённых точках отбирали смешанные образцы почв из четырёх прикопок с различных глубин (0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см, всего 48 образцов). Плотность сложения почвы определяли в каждом из этих слоёв в трёхкратной повторности методом Качинского (Вадюнина, Корчагина, 1986) с использованием цилиндра объёмом 100 см³. Определение влажности почв проводили гравиметрическим методом после высушивания при 105 °С в течение 8 часов.

Для выполнения анализов использовали воздушно-сухие образцы почв, просеянные через сито с диаметром ячеек 2 мм с исключением корней и твёрдых включений. Все анализы проводили в 3-кратной аналитической повторности. Показатели сравнивали в ряду пашня – луг – лес и в динамике за 9 лет для каждой из трех экосистем.

Химические и микробиологические анализы. В измельчённых до пудры образцах почвы определяли содержание общего углерода (С) и общего азота (N) на СНN-анализаторе (Elementar, Германия). Рассчитывали отношение С:N (делением С на N в процентах).

Скорость базального дыхания (БД) почвы измеряли по интенсивности выделения СО₂. Навеску воздушно-сухой почвы массой 10 г помещали во флаконы объёмом 110–115 мл, увлажняли до 70% от наименьшей влагоёмкости, закрывали полиэтиленовыми плёнками, пропускающими воздух и инкубировали при температуре 22 °С в течение 7 дней. После инкубации флаконы с почвой проветривали, герметично закрывали резиновыми пробками и выдерживали при той же температуре 15–20 часов. Затем определяли концентрацию СО₂ во флаконе с использованием портативного газоанализатора LiCor 820 (США). Скорость БД (мкг С г⁻¹ ч⁻¹) рассчитывали по формуле:

$$\text{БД} = (C_1 - C_0) \times 12 \times V_{\text{возд.}} \times 1000 / m \times 22,4 \times t \times 100 \quad (1),$$

где C_0 и C_1 – начальная и конечная концентрации СО₂ во флаконе (объёмные %); $V_{\text{возд.}}$ – объём воздуха во флаконе (мл); t – время инкубации (час); m – навеска почвы (г); 12 – молярный вес углерода (г); 22,4 – молярный объём (л).

Рассчитывали отношение БД:С (мкг С г⁻¹ С ч⁻¹) для характеристики доступности органического вещества для почвенных микроорганизмов.

Содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания по скорости выделения СО₂ после обогащения почвы дополнительным источником углерода – глюкозой (Anderson, Domsch, 1978). Для определения $C_{\text{мик}}$ флаконы с почвой после измерения БД проветривали и вносили 1 мл раствора глюкозы (концентрация 10 мг г⁻¹ почвы). Через час после добавления субстрата флаконы снова проветривали, герметично закрывали, инкубировали при температуре 22 °С в течение двух часов и затем снова определяли концентрацию СО₂ во флаконе. Скорость субстрат-индуцированного дыхания рассчитывали по формуле (2), выражая в мкл СО₂ г⁻¹ почвы ч⁻¹. Содержание $C_{\text{мик}}$ рассчитывали согласно уравнению (Anderson, Domsch, 1978):

$$C_{\text{мик}} = V_{\text{сид}} \times 40,04 + 0,37 \quad (2),$$

где $C_{\text{мик}}$ – содержание углерода, иммобилизованного в микробной биомассе (мкг С г⁻¹ почвы), $V_{\text{сид}}$ – скорость субстрат индуцированного дыхания (мкл СО₂ г⁻¹ ч⁻¹), 40,04 и 0,37 – коэффициенты перехода от субстрат индуцированного дыхания (мкл СО₂ г⁻¹ ч⁻¹) к микробной биомассе (мкг С г⁻¹).

Определение запасов общего углерода (С, т га⁻¹) и углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$, кг га⁻¹) в слое почвы мощностью Н (см) рассчитывали исходя из их содержания в анализируемом слое почвы C_c (%) и плотности ВД (г см⁻³) этого слоя, согласно формуле:

$$S_c = C_c \times \text{ВД} \times \text{Н} \quad (3)$$

Суммарные запасы С и $C_{\text{мик}}$ в слое 0–30 см получали суммированием запасов С или $C_{\text{мик}}$ во всех исследуемых слоях.

Обработка данных. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel, SigmaPlot 11.0. В таблицах приведены средние значения и стандартная ошибка ($M \pm SE$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров на пашне и залежах. Основные характеристики растительного покрова изучаемых участков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика растительного покрова пашни и залежей, согласно геоботаническим описаниям разных лет

Экосистема	Год	Фитоценоз	Число видов, шт.
Пашня	2014*	Зерно-паровой севооборот, яровой ячмень	1
	2023		
Залежь 16 лет (ЛГ)	2014*	Вейниково-пижмовый луг с подростом ивы и березы	–
	2023	Вейниково-золотарниковый луг с подростом осины, березы, сосны, ивы	27
Залежь 20 лет (БР)	2014*	Залежь, заросшая подростом берёзы, ивы (высота 2-4 м)	–
	2023	Мертвопокровный березняк (формула древостоя Б1Ив, высота 10 м, диаметр 7 см)	29

Примечание.

ЛГ – залежь под вейниково-золотарниковым лугом с 2008 г., БР – залежь под молодым берёзовым лесом с 2004 г. * – описания 2014 года приведены по данным Л.А. Овсепян (2018). Прочерк означает отсутствие данных.

Растительность пашни обуславливается возделываемой в севообороте культурой и рудеральной флорой из банка семян окружающей растительности. В 2023 году на изучаемом участке был высеян яровой ячмень (*Hordeum* sp.). Кроме того, отмечены виды рудеральной флоры: бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), мятлик (*Poa* sp.), дымянка (*Fumaria* sp.).

Растительность **луговой залежи** (ЛГ, залежь 2008 г.) представлена разнотравьем, основу которого составляют вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth) и золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.); всего отмечено 27 видов с общим проективным покрытием площадки 77%. Установлено наличие подроста следующих древесных растений: осина (*Populus tremula* L.), берёза повислая (*Betula pendula* Roth), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ива (*Salix* sp.), что говорит о возможном последующем переходе лугового сообщества в лесное. За 9 лет отмечается увеличение разнообразия подроста древесных пород. За этот период произошла смена субдоминанта с пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare* L.) на золотарник канадский, который является высокоактивным инвазивным видом.

Залежь под **берёзовым лесом** (БР, залежь 2004 г.) представлена сомкнутым мертвопокровным (проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса 6%) древесным сообществом в стадии жердняка с доминированием берёзы повислой и участием ивы козьей (*Salix caprea* L.) со средней высотой 10 м и диаметром 7 см на высоте 1,3 м; формула древостоя 9Б1Ив. В сообществе отмечено произрастание 29 видов. С 2014 года произошло развитие древесного яруса и переход со стадии зарастающей залежи в молодой лес, который характеризуется запасом древесины $137 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ и относительной полнотой древостоя 1,06.

В целом на обследуемых участках обнаружено 43 вида высших сосудистых растений, которые относятся к 42 родам, 23 семействам, 17 порядкам, 3 классам и 2 отделам. Преобладающим по числу видов оказалось семейство Сложноцветные (*Asteraceae*), включающее 10 видов (23%), затем семейства Зонтичные (*Apiaceae*), Розоцветные (*Rosaceae*), по 4 вида (9%) в каждом, и Злаки (*Gramineae*), представленные 3 видами (7%). Сложноцветные, розоцветные и злаки являются лидирующими семействами для Московской области. Насчитывалось 16 одновидовых семейств. Большинство видов характерны для данного региона, среди них встречаются и адвентивные. Основной адвентивный вид — это золотарник канадский, произрастающий на всех исследуемых участках, с наибольшим проективным покрытием (12%) на залежи 2008 г.

Содержание углерода и микробная активность в пахотной и постагрогенных почвах. Содержание общего углерода в почвах залежей за изучаемый период увеличилось на 0,2–1,2%

практически для всего почвенного профиля (0–30 см). Содержание С в слоях 0–5 и 5–10 см пахотной почвы в динамике за 9 лет практически не изменилось, а в нижележащих слоях даже уменьшилось на 0,1–0,2% (табл. 2). Низкое содержание С в почве пашни связано с распашкой и меньшим накоплением растительных остатков по сравнению с постагрогенными экосистемами. Подобную тенденцию наблюдали в постагрогенных дерново-подзолах, в которых содержание общего углерода возрастало и было особенно высоким в верхней части профиля. Так, в слое 0–5 см одиннадцатилетней залежи содержание С увеличилось в 2 раза по сравнению с пахотной почвой, а с увеличением возраста залежи такие различия становились более выражены (Курганова и др., 2022). После выведения пахотных почв из сельскохозяйственного оборота на них начинает развиваться естественная растительность, увеличивается разнообразие растительного покрова и фитомасса (Телеснина и др., 2017, 2019). Таким образом, увеличивается поступление органического вещества в почву при отсутствии отчуждения растительного материала с урожаем, что способствует накоплению общего углерода в бывшем пахотном слое (Post, Kwon, 2000; Guo, Gifford, 2002; Poerplau, Don, 2013; Kalinina et al., 2014; Kurganova et al., 2014).

Таблица 2

Сравнительная характеристика содержания общего углерода (С) и отношение С:N в пахотных и постагрогенных серых почвах под луговой растительностью (ЛГ) и берёзовым лесом (БР)

Экосистема	Слой, см	2014 г.*		2023 г.	
		С, %	С:N ¹	С, %	С:N ²
Пашня	0–5	1,29 ± 0,1**	10,8	1,28 ± 0,1	11,1
	5–10	1,26 ± 0,2	10,5	1,22 ± 0,1	10,9
	10–20	1,25 ± 0,1	10,4	1,13 ± 0,1	10,3
	20–30	1,11 ± 0,0	10,1	0,89 ± 0,1	10,1
Залежь (ЛГ)	0–5	1,64 ± 0,0	10,9	2,15 ± 0,1	13,5
	5–10	1,38 ± 0,5	10,2	1,59 ± 0,0	12,1
	10–20	1,22 ± 0,1	10,2	1,45 ± 0,1	11,8
	20–30	1,21 ± 0,1	10,0	1,22 ± 0,0	11,4
Залежь (БР)	0–5	1,68 ± 0,1	12,0	2,83 ± 0,1	18,0
	5–10	1,35 ± 0,1	10,8	2,06 ± 0,1	17,8
	10–20	1,14 ± 0,1	10,3	1,56 ± 0,2	16,4
	20–30	1,02 ± 0,2	9,7	1,29 ± 0,0	16,5

Примечание.

ЛГ – залежь под вейнико-золотарниковым лугом с 2008 г., БР – залежь под молодым берёзовым лесом с 2004 г. * – данные по отбору 2014 года приведены по материалам Л.А. Овсепян (2018). ** – представлены средние значения и стандартная ошибка ($M \pm SE$, здесь и далее в табл. 2–3). 1 и 2 – для отношения С:N значения стандартной ошибки (SE) не превышают 0,2 и 0,3 соответственно.

Содержание углерода микробной биомассы в слое 0–30 см серых почв в разные годы показано в таблице 3. По мере развития сукцессии происходило незначительное увеличение содержания $S_{\text{мик}}$ на пашне и залежи с луговым разнотравьем от 342 до 371 и от 466 до 497 мкг С г⁻¹ соответственно. В почве залежи под березняком содержание $S_{\text{мик}}$ за 9 лет не изменилось. Такая закономерность объясняется более высоким содержанием в почвах залежей с луговым разнотравьем легкоразлагаемого опада травянистых растений, который является легкодоступным питательным субстратом для почвенных микроорганизмов (Ларионова и др., 2017). В целом для пахотных почв характерно минимальное содержание $S_{\text{мик}}$ как в динамике, так и в хроноряду, так как основным источником органического вещества является корневая фитомасса, остающаяся после вспашки, и, как следствие, поступление легкоразлагаемых растительных остатков лимитировано.

Скорость базального дыхания верхнего слоя (0–5 см) пахотной почвы во времени изменялась незначительно (см. табл. 3). В почве залежи с луговым разнотравьем дыхательная активность была выше в 1,7 раз по сравнению с пашней. Скорость БД залежи под березняком в динамике не изменилась и даже немного снизилась, составив в среднем 1,11 мкг С г⁻¹ ч⁻¹. Средняя скорость БД в изученных залежных почвах была в 1,5–2,0 раза выше, чем на пахотном участке. В верхнем слое (0–5 см) почв пашни и залежи с луговым разнотравьем отмечена тенденция увеличения БД:С в 1,2 раза за наблюдаемый период. Для залежи под березняком выявлена обратная тенденция – уменьшение БД:С в 1,9 раза спустя 9 лет, что может указывать на усложнение качества органического вещества и снижение его доступности для почвенных микроорганизмов в процессе постагрогенной сукцессии в молодых лесах (Ovsepyan et al., 2020).

Таблица 3

Содержание микробного углерода ($S_{\text{мик}}$), базальное дыхание (БД) и динамика изменения величины БД:С в пахотной и постагрогенных серых почвах

Объект	Слой, см	Отбор 2014 г.*			Отбор 2023 г.		
		$S_{\text{мик}}$, мкг С г ⁻¹	БД, мкг С г ⁻¹ ч ⁻¹	БД:С, мкг С г ⁻¹ С ч ⁻¹	$S_{\text{мик}}$, мкг С г ⁻¹	БД, мкг С г ⁻¹ ч ⁻¹	БД:С, мкг С г ⁻¹ С ч ⁻¹
Пашня	0–5	342 ± 30	0,63 ± 0,03	48,8	371 ± 37	0,73 ± 0,14	59,9
	5–10	295 ± 22	0,42 ± 0,01	33,0	293 ± 22	0,44 ± 0,03	36,3
	10–20	266 ± 23	0,45 ± 0,02	36,0	238 ± 17	0,31 ± 0,04	27,4
	20–30	120 ± 5	0,17 ± 0,01	15,0	108 ± 19	0,18 ± 0,06	20,0
Залежь (ЛГ)	0–5	466 ± 34	0,85 ± 0,01	51,8	497 ± 31	1,45 ± 0,24	67,3
	5–10	326 ± 13	0,56 ± 0,03	40,5	234 ± 7	0,64 ± 0,09	40,8
	10–20	192 ± 15	0,43 ± 0,02	35,6	179 ± 6	0,42 ± 0,07	29,2
	20–30	153 ± 11	0,35 ± 0,00	28,9	112 ± 4	0,29 ± 0,02	23,5
Залежь (БР)	0–5	409 ± 40	1,24 ± 0,02	73,7	401 ± 33	1,11 ± 0,07	39,3
	5–10	309 ± 22	0,55 ± 0,02	40,9	187 ± 4	0,53 ± 0,03	25,5
	10–20	156 ± 10	0,33 ± 0,01	28,6	125 ± 12	0,38 ± 0,03	24,5
	20–30	118 ± 5	0,22 ± 0,00	21,2	82 ± 10	0,25 ± 0,02	19,6

Примечание.

ЛГ – залежь под вейнико-золотарниковым лугом с 2008 г., БР – залежь под молодым берёзовым лесом с 2004 г. * – данные по отбору 2014 года приведены по материалам Л.А. Овсепян (2018).

Соотношение С:N в почвах залежей за 9-летний период значительно увеличилось в верхнем слое (0–5 см) и было ожидаемо выше, чем в том же слое пахотной почвы (см. табл. 3). Такая тенденция может быть связана с изменением качества органического вещества почвы в процессе постагрогенной эволюции, поскольку в верхних слоях залежей наблюдается увеличение поступления листовного опада, наземной и корневой биомассы травяно-кустарничкового яруса в связи с отсутствием отчуждения биомассы в виде урожая (Баева и др., 2017).

С глубиной отношение С:N снижается; в слое 20–30 см оно составило 10–11,4 и 9,7–16,5, соответственно, для изученных залежей. Хотя различия по этому показателю мы наблюдаем по всему изученному профилю почв, значительная разница между залежами разных возрастов характерна только для слоя 0–5 см для обоих годов исследования. Увеличение отношения С:N в почвах залежей в широком временном диапазоне закономерно для постагрогенной сукцессии, что указывает на снижение интенсивности разложения органического вещества почв, особенно на более поздних стадиях сукцессии, соответствующих лесным сообществам. Такие же закономерности отмечались для дерново-подзолов залежного хронорядя в Костромской области (Курганова и др., 2021).

Запасы углерода. Суммарный запас общего углерода в слое 0–30 см почвы пашни за истекшие 9 лет после отбора проб в 2014 г. незначительно (5,3 т С га⁻¹) снизился, главным образом, за счёт уменьшения содержания С в слое 20–30 см и неоднородности почвенного покрова. На залежах за истекший период запасы С увеличились на 7,9 и 21,6 т С га⁻¹ (рис. 2 А). При этом наиболее интенсивно почвенный углерод накапливается в верхних слоях почв (0–5 и 5–10 см), что также отмечают и другие исследователи (Баева и др., 2017; Post, Kwon, 2000; Poeplay, Don, 2013; Kalinina et al., 2014).

Таким образом, на основании пространственно-временного анализа, можно заключить, что скорость потери общего углерода почвами пашен может достигать 0,58 т С га⁻¹ год⁻¹, а актуальная скорость его накопления в почвах залежей может составлять 0,87 и 2,4 т С га⁻¹ год⁻¹ для лугового разнотравья и молодого леса, соответственно. Аналогичный результат был получен В.М. Телесниной с соавторами (2019), суммарные запасы углерода в экосистеме 40-летнего леса в 7 раз превысили запасы, определенные для экосистемы пашни. Ю.И. Баева с соавторами (2017) наблюдали подобную тенденцию увеличения запасов углерода с увеличением возраста залежи.

Суммарный запас углерода микробной биомассы в динамике с учётом разброса практически не изменился для пахотной почвы, однако для почвы залежей немного снизился (рис. 2 Б). Наиболее интенсивно $S_{\text{мик}}$ запасается в верхнем слое бывшего пахотного горизонта (0–5 см). Е.А. Сусьян с соавторами (2009) также было показано, что наибольший вклад в запасы $S_{\text{мик}}$ обеспечивал верхний слой почвы.

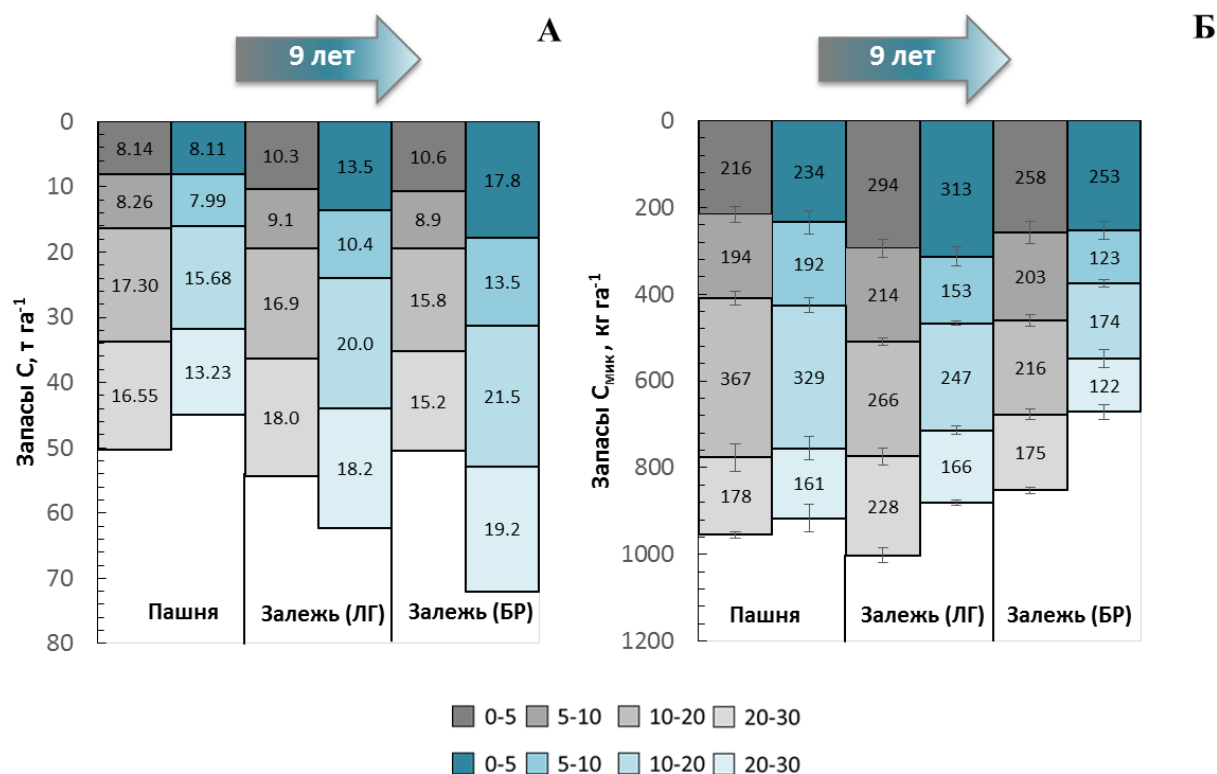


Рисунок 2. Суммарные запасы общего углерода (А) и углерода микробной биомассы (Б) в пахотной и постагрогенных (залежь под вейнико-золотарниковым лугом – ЛГ; залежь под молодым берёзовым лесом – БР) серых почвах в 2014 г. (серый градиент цвета) и 2023 г. (голубой градиент цвета). Для запасов общего углерода 2014 и 2023 гг. (А) значение стандартной ошибки (SE) не превышало $\pm 0,17$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различия по содержанию общего углерода (С), отношению С:N и микробным характеристикам почв в пространственно-временной динамике наиболее выражены в слое 0–5 см. Для почвенного слоя 0–30 см на залежах содержание С за 9-летний период увеличилось на 0,2–1,2%. В то же время, содержание С в слое 0–10 см пахотной почвы за 9 лет практически не изменилось, а в нижележащих почвенных слоях (10–20 и 20–30 см) оно уменьшилось на 0,1–0,2%. Соотношение С:N в почвах залежей за 9-летний период увеличилось в 1,2–1,5 раза в слое 0–5 см, что указывает на усложнение органического вещества почв с течением времени. Микробная активность в слое 0–10 см почвы убывает в следующем ряду: залежь под луговой растительностью > залежь под молодым берёзовым лесом > пашня.

Проведённый пространственно-временной анализ позволил более корректно оценить актуальную скорость изменения запасов С в почвах и показал, что суммарный запас С в слое 0-30 см пахотной почвы за 9 лет незначительно снизился, а на залежах – существенно увеличился. Таким образом, переход пахотной почвы в залежи, занятые луговой или молодой лесной растительностью, приводит к накоплению С в верхней части почвенного профиля, особенно интенсивно в слое 0–5 см. Изменение микробных характеристик почвы за 9 лет не было однонаправленным, определяясь сменой растительной сукцессии, изменением количества и качества поступающего в почву растительного материала.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Ретроспективный анализ выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122111000095-8) в рамках работы молодёжной лаборатории. Полевые исследования и анализ углерода в почвенных образцах выполнены в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

ЛИТЕРАТУРА

- Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудеяров В.Н. Физические свойства и изменения запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 345–353. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029>
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- Казакова А.И., Семиколенных А.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Лукина Н.В. Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв задровых местностей заповедника "Брянский лес" // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15.
- Копчик Г.Н., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С. Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода почвами в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГК им. М.В. Ломоносова // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 40–47.
- 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>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю. В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина 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>
- Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес де Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лукина Н.В., Орлова М.А., Бахмет О.Н., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Казакова А.И., Крышень А.М., Горнов А.В., Смирнов В.Э., Шашков М.П., Ершов В.В., Князева С.В. Влияние растительности на характеристики лесных почв Республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050071>
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. Москва: ГЭОС, 2010. 416 с.
- Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 635 с.
- Макаров И.Б. Дифференциация пахотного горизонта дерново-подзолистых почв в условиях их окультуривания. Диссертация ... канд. биол. наук. Москва, 1981. 249 с.
- Овсепян Л.А. Фракционный состав органического вещества и микробная активность постагрогенных серых лесных почв и черноземов. Диссертация ... канд. биол. наук. Москва, 2018. 202 с.
- Росстат. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 06.07.2024).
- Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>
- Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В. Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв южной тайги // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1233–1240.
- Тейт Р.Л. Органическое вещество почвы: биологические и экологические аспекты. Перевод с англ. О.Д. Масаловой, Д.С. Орлова. Москва: Мир, 1991. 398 с.
- Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
- Телеснина В.М., Жуков М.А. Влияние способа сельскохозяйственного освоения на динамику биологического круговорота и ряда почвенных свойств в ходе постагрогенной сукцессии (Костромская область) // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1114–1129. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1907013X>

- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Cramer V.A., Hobbs R.J., Standish R.J. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly // Trends in Ecology and Evolution. 2008. Vol. 23. P. 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>
- Falkengren-Grerup U., D.-J. ten Brink, Brunet J. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 225. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.027>
- Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis // Global Change Biology. 2002. Vol. 8. P. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. Vol. 152. P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
- Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self restoration of postagrogenic Albeluvisols: soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. Vol. 207–208. No. 1. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
- Kalinina O., Barmin A.N., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic soils of Calcisol–Solonetz complex: Soil development, carbon stock dynamics of carbon pools // Geoderma. 2014. Vol. 237–238. P. 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.013>
- Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. Vol. 129. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. Assessment and prediction of changes in the reserves of organic carbon in abandoned soils of European Russia in 1990–2020 // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41. No. 13. P. 1371–1377. <https://doi.org/10.1134/S1064229308130048>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Global Change Biology. 2014. Vol. 20. P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. Vol. 133. P. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>
- Ovsepyan, L., Kurganova I., de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 743. P. 140829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140829>
- Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., B. van Wesemael, Schumacher J., Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach // Global Change Biology. 2011. Vol. 17. P. 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
- Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // Geoderma 2013. Vol. 192. P. 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>
- Post W.M., Kwon K.C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // Global Change Biology. 2000. Vol. 6. P. 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
- Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils // Eurasian Soil Science. 1982. Vol. 33. P. 141–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 169. P. 137–147. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00304-3)
- Zhang B., Zhang F., Wang X., Chen D., Tian Y., Wang Y., Zheng J., Li S., Li Z., Han G., Zhao M. Secondary succession of soil, plants, and bacteria following the recovery of abandoned croplands in two semi-arid steppes // Land Degradation & Development. 2024. Vol. 35. No. 1. P. 296–307. <https://doi.org/10.1002/ldr.4916>

Поступила в редакцию 28.03.2024

Принята 11.07.2024

Опубликована 11.07.2024

Сведения об авторах:

Романова Анастасия Игоревна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); gavrisheva.ast@gmail.com

Маханцева Виктория Александровна – младший научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); victoriamakhtanceva@gmail.com

Лебедева Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); tanyaniko@mail.ru

Волкова Татьяна Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); volktanya@yandex.ru

Журавлева Анна Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); zhuravlevaai@rambler.ru

Митрохина Екатерина Сергеевна – ведущий инженер лаборатории циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); line05@mail.ru

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Ивашченко Кристина Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории карбомониторинга наземных экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ivashchenko.kv@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Spatio-temporal analysis of soil indicators of the carbon cycle in some postagrogenic ecosystems of the southern Moscow region

© 2024 A. I. Romanova , V. A. Makhantceva , T. Yu. Volkova , T. N. Lebedeva ,
A. I. Zhuravleva , E. S. Mitrokhina , I. N. Kurganova , K. V. Ivashchenko 

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, Russia. E-mail: gavrisheva.ast@gmail.com

The aim of the study. The purpose of this work was to analyze changes over time in soil and soil microbial biomass carbon content, basal respiration, as well as the availability of organic matter for microbial decomposition, in Phaeozem of postagrogenic and arable ecosystems.

Location and time of the study. Moscow region, Pushchino, experimental field station of the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, June 2023.

Methods. The study was carried out with soils under different land use: arable land, abandoned land under meadow vegetation and abandoned land under young birch forest. For each type of land use, geobotanical descriptions were done, and soil samples were taken from the upper part of soil profiles (0–30 cm in 5 cm increments) at four spatially distant points. In soil samples, the content of total carbon (C), the C:N ratio, the content of microbial biomass (C_{mic}) and basal respiration (BR) rate were measured. Taking into account the soil density, the C and C_{mic} reserves in the 0–30 cm layer were assessed.

Results. The highest soil C reserves in the 0–30 cm layer after nine years were under the abandoned land with young birch forest (72 t C ha⁻¹), whereas the lowest reserves (45 t C ha⁻¹) were in arable soils. The actual rate of C accumulation at abandoned sites could be 0.9 and 2.4 t C ha⁻¹ year⁻¹ for the meadow forbs and young forest, respectively. Over the 9-year period the C:N ratio at abandoned sites increased by 1.2–1.5 times in the upper 5 cm layer. The C:N ratio decreased with depth. Soil BD in the 0–10 cm soil layer decreased in the following order: abandoned site with meadow herbs – abandoned site with young birch forest – arable land. There was a tendency to increased BD:C in the upper 5 cm soil layer at arable and abandoned (with meadow herbs) sites by 1.2 times over the observed period (from 49 to 60 µg C g⁻¹ C h⁻¹ and from 52 to 67 µg C g⁻¹ C h⁻¹, respectively). For an abandoned site with a young birch forest, the opposite trend was revealed, i.e. a decrease in BD:C by 1.9 times (from 74 to 39 µg C g⁻¹ C h⁻¹).

Conclusions. The conversion of arable land into the abandoned one occupied by meadow or young forest vegetation, both in the chronosequence and after nine years of spontaneous revegetation, leads to the soil C accumulation, especially in the upper part of the former arable horizon.

Keywords: arable land; abandoned land; carbon stocks; microbial biomass reserves, basal respiration.

How to cite: Romanova A.I., Makhantseva V.A., Volkova T.Yu., Lebedeva T.N., Zhuravleva A.I., Mitrokhina E.S., Kurganova I.N., Ivashchenko K.V. Spatio-temporal analysis of soil indicators of the carbon cycle in some postagrogenic ecosystems of the southern Moscow region. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(3). e261 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i3.261](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.261)

FUNDING

The retrospective analysis was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 122111000095-8) as part of the work of the youth laboratory. Field research and analysis of carbon in soil samples were carried out as part of the implementation of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas flows on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system for recording data on the flows of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (project No. 123030300031-6).

REFERENCES

- Baeva Y.I., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Kudeyarov V.N., Pochikalov A.V. Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 3. P. 327–334. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030024>
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
- Kazakova A.I., Semikolennykh A.A., Gornov A.V., Gornova M.V., Lukina N.V. Influence of vegetation on the lability characteristics of sandur areas of the Bryansky Les Nature Reserve. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2018. Vol. 73. P. 100–106. <https://doi.org/10.3103/S0147687418030055>
- Koptsik G.N., Kupriianova Yu.V., Kadulin M.S. Spatial variability of carbon dioxide emission by soils in main types of forest ecosystems in Zvenigorod biological station of Moscow State University. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2018. Vol. 73. P. 81–88. <https://doi.org/10.3103/S0147687418020035>
- 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 Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation. *The Journal of Soils and Environment*. 2022. Vol. 5. No. 3. 2. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>

- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov 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 Science*. 2023. Vol. 56. P. 1232–1246. <https://doi.org/10.1134/S1064229323601130>
- Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes de Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V. The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study. *Lesovedenie*. 2017. No. 2. P. 128–139. (in Russian).
- Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Kryshen A.M., Gornov A.V., Smirnov V.E., Shashkov M.P., Ershov V.V., Knyazeva S.V. The influence of vegetation on the forest soil properties in the Republic of Karelia // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 7. P. 793–807. <https://doi.org/10.1134/S1064229319050077>
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A. в квадрат (умер), Nefedova T.G. Dynamics of Agricultural lands of Russia in XX century and Postagrogenic Restoration of vegetation and soils. Moscow: GEOS, 2010. 416 p. (in Russian).
- Mayevsky P.F. Flora of the central zone of the European part of Russia. 11th ed. Moscow: Partnership of Scientific Publications KMK, 2014. 635 p. (in Russian).
- Makarov I.B. Differentiation of the arable horizon of soddy-podzolic soils under cultivation conditions. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow, 1981. 249 p. (in Russian).
- Ovsepyan L.A. Fractional composition of organic matter and microbial activity of postagrogenic gray forest soils and chernozems. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow, 2018. 202 p. (in Russian).
- Rosstat. Agriculture, hunting and forestry. [Electronic resource]. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (accessed on 06.04.2024). (in Russian).
- Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A. Dynamics of soil properties and carbon stocks structure in postagrogenic ecosystems of southern taiga during natural reforestation. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 2. P. 240–252. <https://doi.org/10.1134/S1064229320020106>
- Susyan E.A., Ananyeva N.D., Gavrilenko E.G., Bobrovskii M.V., Chernova O.V. Microbial biomass carbon in the profiles of forest soils of the southern taiga zone. *Eurasian Soil Science*. 2009. Vol. 42. No. 10. P. 1148–1155. <https://doi.org/10.1134/S1064229309100093>
- Teit R.L. Soil organic matter: biological and ecological effects. New York, Chichester: John Wiley & Sons, 1987. 291 p.
- Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of soil properties and plant composition during postagrogenic evolution in different bioclimatic zones. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 12. P. 1515–1534. <https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
- Telesnina V.M., Zhukov M.A. The influence of agricultural land use on the dynamics of biological cycling and soil properties in the course of postagrogenic succession (Kostroma oblast) // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1122–1136. DOI: 10.1134/S1064229319070135
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Cramer V.A., Hobbs R.J., Standish R.J. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology and Evolution*. 2008. Vol. 23. P. 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>
- Falkengren-Grerup U., D.-J. ten Brink, Brunet J. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils. *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 225. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.027>
- Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*. 2002. Vol. 8. P. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics. *Geoderma*. 2009. Vol. 152. P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
- Kalinina O., Barmin A.N., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic soils of Calcisol–Solonetz complex: Soil development, carbon stock dynamics of carbon pools. *Geoderma*. 2014. Vol. 237–238. P. 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.013>
- Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self restoration of postagrogenic Albeluvisols: soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools. *Geoderma*. 2013. Vol. 207–208. No. 1. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>

- Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia. *Catena*. 2015. Vol. 129. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. Assessment and prediction of changes in the reserves of organic carbon in abandoned soils of European Russia in 1990–2020. *Eurasian Soil Science*. 2008. Vol. 41. No. 13. P. 1371–1377. <https://doi.org/10.1134/S1064229308130048>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan. *Catena*. 2015. Vol. 133. P. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>
- Ovsepyan, L., Kurganova I., de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Conversion of cropland to natural vegetation boosts microbial and enzyme activities in soil. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 743. P. 140829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140829>
- Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., B. van Wesemael, Schumacher J., Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
- Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma* 2013. Vol. 192. P. 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>
- Post W.M., Kwon K.C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global Change Biology*. 2000. Vol. 6. P. 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
- Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Eurasian Soil Science*. 1982. Vol. 33. P. 141–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 169. P. 137–147. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00304-3)
- Zhang B., Zhang F., Wang X., Chen D., Tian Y., Wang Y., Zheng J., Li S., Li Z., Han G., Zhao M. Secondary succession of soil, plants, and bacteria following the recovery of abandoned croplands in two semi-arid steppes // *Land Degradation & Development*. 2024. Vol. 35. No. 1. P. 296–307. <https://doi.org/10.1002/ldr.4916>

Received 28 March 2024

Accepted 11 July 2024

Published 11 July 2024

About the authors:

Anastasia I. Romanova – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); gavrisheva.ast@gmail.com

Victoria A. Makhantceva – Junior Researcher in the Laboratory of Carbomonitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); victoriamakhantceva@gmail.com

Lebedeva Tatyana N. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); tanyaniko@mail.ru

Tatyana Yu. Volkova – Junior Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); volktanya@yandex.ru

Anna I. Zhuravleva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); zhuravlevaai@rambler.ru

Ekaterina S. Mitrokhina – Leading Engineer in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); line05@mail.ru

Irina N. Kurganova – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

Kristina V. Ivashchenko – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Carbon Monitoring of Terrestrial Ecosystems in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ivashchenko.kv@gmail.com

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)