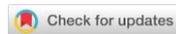


УДК 631.417.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127



Ссылки для цитирования:

Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М. Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 79-127. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127

Cite this article as:

Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Semenov M.V., Zinyakova N.B., Udaltsov S.N., Semenov V.M., Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 79-127, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127

Благодарность:

Работа выполнена 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 учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6). Авторы выражают благодарность ЦКП ФИЦ ПНЦБИ РАН за приборное обеспечение исследований.

Acknowledgments:

The research was carried out as part 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 fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (Registration number: 123030300031-6). The authors would like to express their gratitude to the СКР ФИЦ ПНЦБИ of RAS for instrumental support of the studies.

**Распределение органического углерода между
структурными и процессными пулами в серой
лесной почве разного землепользования**

© 2024 г. Т. Н. Лебедева^{1*}, Д. А. Соколов^{1,2**},
М. В. Семенов^{2***}, Н. Б. Зинякова^{1****}, С. Н. Удальцов^{1*****},
В. М. Семенов^{1*****}

¹Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН – ФИЦ ПНЦБИ РАН, Россия,
142290, Пущино, Московская область, ул. Институтская, 2

*<https://orcid.org/0000-0001-6588-778X>,

**<https://orcid.org/0000-0002-6183-6798>,

***<https://orcid.org/0000-0002-2167-9097>,

****<https://orcid.org/0000-0003-1891-7944>,

*****<https://orcid.org/0000-0002-2539-6107>.

²ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>, e-mail: v.m.semenov@mail.ru.

Поступила в редакцию 10.08.2023, после доработки 28.08.2023,
принята к публикации 07.02.2024

Резюме: Дана обобщенная сводка содержания органического углерода ($C_{орг}$) в подтипах серой лесной почвы, залегающих на территории России. Показано, что в гумусовых горизонтах целинных светло-серых, типичных серых и темно-серых лесных почв содержится в среднем 2.16 ± 0.67 , 2.42 ± 0.61 и $3.58 \pm 0.95\%$ $C_{орг}$, а в пахотном слое сельскохозяйственных почв – 1.36 ± 0.40 , 1.71 ± 0.40 и $2.84 \pm 0.86\%$ соответственно. В органическом веществе образцов разных горизонтов серой лесной почвы (Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) под мелколиственным лесом и посевом ячменя выделяли структурные (твердые органические частицы размером 0.05–2 мм, $C_{РОМ}$, и минерально-ассоциированное органическое вещество размером <0.05 мм, $C_{МАОМ}$) и процессные (потенциально-минерализуемое органическое вещество, C_0 , и микробная биомасса, $C_{мик}$) пулы. Отношение $C_{РОМ}/C_{МАОМ}$ в верхних горизонтах почвы под лесом и пашней равнялось 0.60 и 0.26 соответственно, и уменьшалось с глубиной до 0.05 при всех рассмотренных видах землепользования. Размеры пулов $C_{МАОМ}$, $C_{РОМ}$, C_0 и $C_{мик}$ коррелировали друг с другом и зависели от глубины почвенного слоя, тогда как влияние землепользования на соотношение пулов обнаруживалось только для поверхностных горизонтов. Вклад $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ в потенциально-минерализуемый пул органического вещества серой лесной почвы составлял 20–41 и 71–87% соответственно. Согласно полученным данным величина пула C_0 была почти эквивалентна годовым размерам гетеротрофной эмиссии CO_2 из почвы. Подчеркивается важность определения размеров и соотношений

структурных и процессных пулов почвенного органического вещества в программах мониторинга углерода и рекарбонизации агроэкосистем.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество; секвестрация; депонирование; органическое вещество твердых частиц; минерально-ассоциированное органическое вещество; потенциально-минерализуемое органическое вещество; микробная биомасса.

Organic carbon distribution between structural and process pools in the gray forest soil of different land use

© 2024 T. N. Lebedeva^{1*}, D. A. Sokolov^{1,2**}, M. V. Semenov^{2***},
N. B. Zinyakova^{1****}, S. N. Udaltsov^{1*****}, V. M. Semenov^{1*****}

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science,
Russian Academy of Sciences,*

2 Institutskaya Str., Pushchino 142290, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0001-6588-778X>,

**<https://orcid.org/0000-0002-6183-6798>,

***<https://orcid.org/0000-0002-2167-9097>,

****<https://orcid.org/0000-0003-1891-7944>,

*****<https://orcid.org/0000-0002-2539-6107>.

²*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,*

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

***<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>, e-mail: v.m.semenov@mail.ru.

Received 10.08.2023, Revised 28.08.2023, Accepted 07.02.2024

Abstract: The summarized data on the content of organic carbon (C_{org}) in the subtypes of gray forest soils occurring on the territory of Russia was presented. It was shown that the humus horizons of virgin light-gray, typical-gray, and dark-gray forest soils contain, on average, 2.16 ± 0.67 , 2.42 ± 0.61 , and $3.58 \pm 0.95\%$ C_{org} , respectively, while the plowing layers of arable soils contain 1.36 ± 0.40 , 1.71 ± 0.40 , and $2.84 \pm 0.86\%$, respectively. Structural (particulate organic matter 0.05–2 mm in size, C_{POM} , and mineral-associated organic matter <0.05 mm in size, C_{MAOM}) and process (potentially mineralizable organic matter, C_0 , and microbial biomass, C_{mic}) pools were isolated in the organic matter of samples from different horizons of gray forest soils (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) under small-leaved forest and barley crop. The C_{POM}/C_{MAOM} ratio in the upper soil horizons under forest and arable land was 0.60 and 0.26, respectively, and this ratio decreased with

depth to 0.05 under both land uses. The sizes of the C_{MAOM} , C_{POM} , C_0 , and C_{mic} pools correlated with each other and depended on the depth of the soil horizon, while the effect of land use on the pool ratios was found only for the surface horizons. The contribution of C_{POM} and C_{MAOM} to the potentially mineralizable pool of organic matter in gray forest soil was 20–41 and 71–87%, respectively. According to the obtained data, the size of the C_0 pool was almost equal to the annual amount of the heterotrophic CO_2 emission from the soil. It was emphasized that determining of the sizes and ratios of structural and process soil organic matter pools should be important in the programs of carbon monitoring and recarbonization of agroecosystems.

Keywords: soil organic matter; sequestration; storage; particulate organic matter; mineral-associated organic matter; potentially mineralizable organic matter; microbial biomass.

ВВЕДЕНИЕ

Серые лесные почвы являются типичными для лиственно-лесной и лесостепной зон Евразии. Залегающие в лесостепной зоне серые лесные почвы зачастую называются серыми лесостепными, подчеркивая тем самым их более южное географическое положение и формирование в более теплых климатических условиях, по сравнению с широколиственно-лесными и подтаежными ландшафтами (Ахтырцев, 1979; Чендев, 2008). Согласно эколого-генетической классификации, тип серых лесных почв подразделяется, в зависимости от уровня гумусированности и признаков элювиально-иллювиальной дифференциации профиля, на светло-серые, серые и темно-серые подтипы. Характерны сочетания серых лесных почв с глеевыми, глееватыми и эродированными серыми лесными почвами (Алифанов, 1995; Ахтырцев, 1979; Зайдельман, Ковалев, 1994; Ковалев и др., 2021; Урусевская и др., 2000). Площадь серых лесных почв на территории Российской Федерации составляет примерно 41 млн га (Орлов и др., 1996; Единый государственный реестр..., 2014). Подтипы светло-серых, серых и темно-серых лесных почв выявлены соответственно в 38, 42 и 34 субъектах Российской Федерации (Единый государственный реестр..., 2014). На эти подтипы приходится соответственно 0.1–15.2, 0.1–30.5 и 0.1–12.6% территории этих субъектов. В Московской области серые лесные почвы занимают 7.3% территории (Почвы..., 2002).

Особенностью серых лесных почв является высокая изменчивость содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в гумусовом горизонте в зависимости от состава растительности, почвообразующей породы, рельефа, глубины залегания грунтовых вод и других факторов. Поэтому в разных обобщениях были получены разные средние содержания $C_{\text{орг}}$ в светло-серых лесных (от 2.00 до 2.05%), типичных серых (от 2.17 до 3.02%) и темно-серых лесных почвах (от 3.45 до 4.50%) (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996; Урусевская и др., 2000). Для серых лесных почв характерна тенденция увеличения содержания $C_{\text{орг}}$ с запада на восток с максимумом в Средней Сибири (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996). По сравнению с гумусовым горизонтом содержание $C_{\text{орг}}$ в серых лесных почвах уменьшается с глубиной в 2–10 и более раз, поэтому на верхний (0–20 см) слой приходится примерно половина от запасов органического углерода в метровой толще (Орлов и др., 1996). Запасы $C_{\text{орг}}$ в 0–100 см слое серых лесных почв в 1.2 и 2.6 раз больше, чем в каштановых и дерново-подзолистых почвах, но меньше, чем в черноземах в 1.7 раз. Таким образом, серые лесные почвы являются значимым глобальным резервуаром и стоком органического углерода.

Серые лесные почвы обладают умеренным агроресурсным потенциалом и благоприятны для высокопродуктивного земледелия. На серые лесные почвы приходится около 15% пахотных земель России (Единый государственный реестр..., 2014). Степень распаханности серых лесных почв достигала в прошлом свыше 40% (Урусевская и др., 2000). В 90-х годах XX в. значительная часть пахотных серых лесных почв перешла в разряд залежных и брошенных земель, заросших луговой и древесно-кустарниковой растительностью (Люри и др., 2010). Пахотные подтипы серых лесных почв характеризуются гомогенным пахотным горизонтом, обедненным, как правило, органическим углеродом, по сравнению с естественными аналогами, но большей мощности, чем гумусовый горизонт ненарушенных почв из-за припахивания и перемещения органического вещества из верхних слоев. Потери органического вещества в 0–20 см слое распахиваемых серых лесных почв на протяжении 90 и 270 лет составили от 46 и 61% соответственно, по сравнению с целинными почвами под лесом, тогда как

в слое 20–40 см отмечается накопление органического вещества (Чендев, 2008). В пахотных горизонтах светло-серых, серых и темно-серых лесных почв содержится соответственно на 27, 18 и 25% меньше $C_{\text{орг}}$, чем в необрабатываемых подтипах (Урусевская и др., 2000), по другим оценкам – на 15, 27 и 34% (Дядькина, 2016). Деградационные, как и проградационные, изменения в содержании органического вещества в серых лесных почвах не могут не затрагивать качественных характеристик почвенного органического вещества (ПОВ), которые, как правило, более чувствительны к внешним факторам и нарушающим воздействиям.

Ранее о качестве органического вещества серых лесных почв судили по показателям гумусового состояния почв, среди которых ключевая роль отводилась определению фракционного и группового состава гумуса (Гришина, 1986; Орлов и др., 2004). Этот познавательный подход был оправдан в рамках доминировавшей прежде гумусовой (гуминовой) теории ПОВ (Заварзина и др., 2021; Когут, Семенов, 2015). В последние годы широкую известность приобрела континуумная модель ПОВ (Lehmann, Kleber, 2015) с подразделением ПОВ на два отдельных пула, включающих свободные и окклюдированные твердые органические частицы (particulate organic matter, POM) размером 2–0.053 мм и связанные почвенными минералами микрочастицы и биомолекулы (mineral-associated organic matter, MAOM) размером <0.053 мм (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023с; Cotrufo et al., 2022; Cotrufo et al., 2019; Cotrufo et al., 2013; Haddix et al., 2020; Just et al., 2023; Kögel-Knabner et al., 2022; Lavallee et al., 2020). Гранулометрическое разделение ПОВ на POM и MAOM позволяет количественно дифференцировать пулы с различными скоростями оборота, химическим составом и путями образования (Артемьева, 2010; Семенов и др., 2023b; Angst et al., 2023; Just et al., 2021; Lavallee et al., 2020; Poeschlau et al., 2018; Yu et al., 2022), получать данные, пригодные для использования в моделях динамики почвенного углерода и его отклика на климатические изменения (Cotrufo et al., 2019; Derrien et al. 2023; Dobarco et al., 2023; Haddix et al., 2020; Lavallee et al., 2020; Lugato et al., 2021) и разрабатывать новые способы длительного сохранения углерода в почве (Begill et al., 2023; Derrien et al., 2023; Just et al., 2023; Kögel-Knabner et al., 2022;

Witzgall et al., 2021).

В этой связи происходит переориентация научных и мониторинговых исследований на получение данных по содержанию, запасам и фракционному соотношению углерода РОМ ($C_{РОМ}$) и МАОМ ($C_{МАОМ}$) в разных почвах в зависимости от климатических условий, структуры ландшафта, растительности, землепользования, систем земледелия, способов агротехники и других условий и факторов. Создаются национальные и глобальные базы данных по территориальному и профилному распределению $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ в том числе на картографической основе. Устанавливаются связи $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ с размерами и качеством поступлений в почву надземной и подземной биомассы растений и органических удобрений, с почвенным микробиомом и минералогическим составом почвы, исследуется состав, биологические, химические и физические характеристики РОМ и МАОМ. Для более полной оценки свойств и функций ПОВ, наряду с определением РОМ и МАОМ, которые были отнесены к группе структурных пулов, было предложено определять процессные пулы: потенциально-минерализуемый углерод (C_0) и углерод микробной биомассы ($C_{мик}$) (Семенов и др., 2023b). Подразделение ПОВ на структурные и процессные пулы позволило получить новую информацию о многолетней динамике $C_{орг}$ в разноудобренной почве (Семенов и др., 2023a).

В задачи данного исследований входило: 1) определить содержание, запасы и соотношения углерода в структурных ($C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$) и процессных (C_0 и $C_{мик}$) пулах органического вещества в профиле серой лесной почвы разного землепользования; 2) оценить минерализационный потенциал РОМ и МАОМ серой лесной почвы и сравнить вклад этих двух гранулометрических фракций ПОВ как источников продукции CO_2 почвой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях использовали образцы серой лесной почвы (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)), отобранные на юге Московской области под вторичным лесом возрастом свыше 75 лет с доминированием березы и со старопахотного участка, засеянного в год отбора ячменем. Почвенные образцы отбирали из трех стенок почвенных разрезов в слоях, соответствующих поч-

венным горизонтам. Свежеотобранные образцы высушивали на открытом воздухе до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Координаты точек отбора проб и основные физико-химические характеристики почвы представлены в таблице 1.

Гранулометрическое подразделение почвы на РОМ (2–0.05 мм), распределенное во фракции песка, и тонкодисперсное МАОМ (<0.05 мм) в составе пыли и глины производили по методу Cambardella, Elliott (1992) в модификации Семенова и др. (2023b) в трехкратной повторности. Навеску воздушно-сухой почвы массой 10 г диспергировали в 30 мл 0.5%-ного раствора гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) на шейкере в течение 15 ч при скорости 180 об./мин. Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0.05 мм. Остаток на сите несколько раз промывали дистиллированной водой до получения прозрачной промывной жидкости. Полученную массу РОМ и песка на сите сушили в течение 1 ч при 40 °С, после чего количественно переносили в емкость, досушивали в течение суток при 65 °С и взвешивали.

Для определения МАОМ суспензию <0.05 мм вместе с промывочной жидкостью количественно собирали в емкости и отстаивали в течение суток. Надосадочную жидкость и осадочную массу последовательно центрифугировали в течение 30 мин со скоростью 2 500 об./мин, полученный осадок объединяли и высушивали при 65 °С в течение суток. Массу МАОМ вычисляли по разнице между навеской почвы и массой РОМ. В высушенной и растертой до пудры массе РОМ и МАОМ определяли содержание углерода ($C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$).

Содержание C_0 в почве определяли по количеству $C\text{--CO}_2$, выделившегося в течение 178-суточной инкубации почвенных образцов при постоянных условиях температуры (22 °С) и влажности (25 вес. %), согласно ранее опубликованной методике (Семенов и др., 2006; Семенов и др., 2018). Минерализационный потенциал гранулометрических фракций почвы определялся так же, как и потенциально-минерализуемое органическое вещество в интактном образце почвы.

Таблица 1. Физико-химические характеристики серой лесной почвы разного землепользования
Table 1. Physical-chemical characteristics of gray forest soil under different land use

Слой, см	C _{орг}	N _{общ}	C/N	Гранулометрические фракции, %		Плотность, г/см ³
				<0.01 мм	<0.001 мм	
Мелколиственный лес, 54°49'4" N; 37°33'58" E						
2–18	$\frac{1.85 \pm 0.09}{32.8}$	$\frac{0.16 \pm 0.01}{3.2}$	11.7	41	18	1.11
18–66	$\frac{0.56 \pm 0.03}{36.5}$	$\frac{0.07 \pm 0.00}{4.4}$	8.3	48	27	1.36
66–100	$\frac{0.38 \pm 0.02}{19.9}$	$\frac{0.05 \pm 0.00}{2.7}$	7.3	50	34	1.55
Пашня, 54°49'19" N; 37°33'33" E						
0–20	$\frac{1.21 \pm 0.05}{31.9}$	$\frac{0.12 \pm 0.00}{10.3}$	10.1	40	15	1.32
20–61	$\frac{0.69 \pm 0.02}{43.4}$	$\frac{0.09 \pm 0.00}{3.2}$	8.1	50	26	1.53
61–100	$\frac{0.43 \pm 0.05}{26.9}$	$\frac{0.06 \pm 0.01}{5.4}$	7.2	52	34	1.60

Примечание. Над чертой – % от массы почвы, под чертой – т/га.

Note. Above the line – % of soil weight, below the line – t/ha.

Навески РОМ и МАОМ массой 1 г каждого образца в трехкратной повторности помещали в пробирки емкостью 12 мл, увлажняли до 25 вес. % и инкубировали в течение 177 сут. при постоянной влажности и температуре, регулярно измеряя скорость выделения С–СО₂. По кумулятивным количествам С–СО₂ за время инкубации рассчитывали потенциальную минерализацию органического вещества С_{0-РОМ} и С_{0-МАОМ}, выражая в мг/100 г и в процентах от массы фракции. Учитывая долю гранулометрических фракций в почве, рассчитывали вклад РОМ и МАОМ в потенциально-минерализуемый пул всей почвы. Микробную биомассу (С_{мик}) в почве определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) в модификации, предложенной Н.Д. Ананьевой (Ананьева и др., 2011).

Содержание С_{орг} в почве и в гранулометрических фракциях РОМ и МАОМ определяли сухим сжиганием на CN-анализаторе Vario Cube (Elementar, Германия), предварительно растирая образцы до частиц размера <0.25 мм. Экспериментальные данные приведены в виде средних величин из трех аналитических повторений и их стандартных отклонений. Математическую обработку данных проводили с помощью MS Excel и программы Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание, запасы и распределение С_{орг} в профиле серой лесной почвы. Серая лесная почва относится к ряду зональных почв, в которых образование и накопление органического вещества наиболее отчетливо обусловлено почвообразовательными процессами и биоклиматическим потенциалом, тесно связанным с продолжительностью периода биологической активности в природно-географической зоне. Обновленные сведения о содержании С_{орг} в целинных и пахотных подтипах серых лесных почв с добавлением данных за последние два десятилетия, приведены в таблице 2. Средние содержания С_{орг} в светло-серой, типичной серой и темно-серой лесной почвах естественных угодий оказались одного и того же порядка с полученными другими авторами (Дядькина, 2016; Орлов и др., 1996; Урусевская и др., 2000), но не идентичны таковым. Наиболее сильные расхождения проявляются для типичных серых и темно-серых лесных почв. В целом в гумусовом го-

ризонте необрабатываемых серых и темно-серых лесных почв содержится в 1.1 и 1.7 раз больше $C_{\text{орг}}$, чем в светло-сером подтипе.

Пахотные горизонты светло-серых, серых и темно-серых лесных почв, используемых в земледелии, обеднены органическим углеродом соответственно на 59, 39 и 26% по сравнению с целинными аналогами (табл. 2). Особенно низкая обеспеченность органическим веществом свойственна неудобренным почвам. Перевод земель под залежь или использование органической системы удобрения, почвозащитной обработки почвы и способов диверсификации севооборотов препятствуют перманентному дегумусированию пахотных почв или даже способствуют восстановлению запасов органического вещества до уровня естественных аналогов.

Содержание $C_{\text{орг}}$ в серой лесной почве, залегающей на правобережье р. Оки под мелколиственным лесом, было ниже среднестатистического для типичных серых почв, больше соответствуя по уровню гумусированности светло-серой почве (табл. 1 и 2). Низкая обеспеченность органическим веществом свойственна и для длительно обрабатываемой серой лесной почвы. По шкале обеспеченности пахотных почв органическим веществом исследуемая серая лесная почва относится к классу с содержанием $C_{\text{орг}}$ меньше минимального (Когут, 2012). Так же, как и в случае с почвой под лесом, в пахотном горизонте содержалось примерно столько же $C_{\text{орг}}$, сколько обычно обнаруживается в пахотных светло-серых почвах. Коэффициент обедненности пахотной почвы района исследований органическим углеродом составлял 54%, занимая промежуточное положение между значениями, полученными для светло-серых и типичных серых лесных почв.

Следовательно, нетипичное для серой лесной почвы содержание $C_{\text{орг}}$ на участках сопредельного с долиной р. Ока ландшафта является особенностью гумусообразования, присущего этому местоположению. Отмечается более сильная обогащенность нижних горизонтов пахотной серой лесной почвы органическим углеродом, по сравнению с целинной.

Таблица 2. Содержание $C_{\text{орг}}$ в гумусовом и пахотном горизонтах серых лесных почв, % от массы почвы
Table 2. C_{org} content in the humus and plowing horizons of the gray forest soils, %

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Светло-серая лесная</i>						
Новосибирская область	2.81	1.90	1.72	1.92	Не опр.	Якименко, Конарбаева, 2016
Иркутская область	1.24	1.12	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Рябинина, 2012
Тюменская область	2.06	1.86	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Республика Татарстан	3.42	1.28	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015
Республика Башкортостан	1.43	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабиров и др., 2001
Республика Башкортостан	3.03	1.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015
Кировская область	Не опр.	0.70	0.67	0.71	Не опр.	Кодочилова и др., 2020
Нижегородская область	1.68	1.22	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	2.02	1.51	0.97	1.46	2.69	Полякова, 2007
Нижегородская область	Не опр.	0.90	0.83	0.87	1.03	Титова и др., 2013

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Светло-серая лесная</i>						
Нижегородская область	Не опр.	0.92	Не опр.	Не опр.	1.05	Комарова, Козлова, 2016
Среднее по России	2.06	1.59	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	2.00	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	2.05	1.77	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	2.16	1.36	1.05	1.24	1.59	
<i>Серая лесная</i>						
Алтайский край	2.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Пивоварова и др., 2014
Республика Бурятия	2.46	1.79	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Чимитдоржиева, 2016
Тюменская область	1.89	2.15	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Красноярский край	2.25*	1.88	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Шпедт, Трубников, 2015
Красноярский край	2.76 (3.59*)	2.17	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Сорокина, 2018
Республика Татарстан	3.42	1.91	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Республика Башкортостан	3.66	2.26	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015
Республика Башкортостан	1.94	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабиров и др., 2001
Республика Башкортостан	Не опр.	Не опр.	2.39	2.65	2.81	Хабиров, 1993
Нижегородская область	2.09	1.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	1.95	1.71	1.37	2.05	3.04	Полякова, 2007
Владимирская область	Не опр.	1.9 1.1	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Артемьева, Травникова, 2006
Владимирская область	Не опр.	Не опр.	1.55	1.84	1.91	Окорков и др., 2016
Владимирская область	Не опр.	Не опр.	1.68	1.83	1.98	Сычев и др., 2020
Пензенская область	Не опр.	1.51	1.50	Не опр.	1.59	Иванов, Кузин, 2009

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Рязанская область	Не опр.	1.55	1.38	1.59	1.80	Ушаков, 2007
Тульская область	4.0 1.6	2.4 1.4 1.6	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Артемьева, Травникова, 2006
Тульская область	2.29	1.81	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Соколов и др., 2021
Тульская область	1.71*	1.25	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Липатов и др., 2005
Тульская область	1.95*	1.67	Не опр.	1.59	2.02	Зинякова и др. 2013
Московская область	2.38	1.52	1.30	1.74	5.16	Исмагилова, 2010
Московская область	1.43	0.96	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ходжаева, Семенов, 2015
Московская область	2.08	1.07	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Баева и др. 2017
Московская область	1.88	1.44	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Семенов и др., 2022
Московская область	Не опр.	Не опр.	1.13	1.18	2.03	Семенов и др. 2023a

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Серая лесная</i>						
Среднее по России	3.02	2.56	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	2.60	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	2.17	1.71	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	2.42	1.71	1.54	1.81	2.48	
<i>Темно-серая лесная</i>						
Алтайский край	3.00	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Пивоварова и др., 2014
Тюменская область	3.84	3.07	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ерёмин и др., 2018
Красноярский край	4.83*	4.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Шпедт, Трубников, 2015
Республика Татарстан	4.00	3.25	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Александрова и др., 2015
Республика Башкортостан	3.75	3.52	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Хабилов и др., 2001
Республика Башкортостан	5.16	3.71	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Иванова и др., 2015

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Регион	Лес (залежь*)	Пашня	Без удобрений	НРК	Навоз	Ссылка
<i>Темно-серая лесная</i>						
Нижегородская область	3.02	2.38	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Полякова и др., 2011
Нижегородская область	2.54	2.32	2.24	2.44	7.43	Полякова, 2007
Тамбовская область	4.78	2.51	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ахтырцев, Ефанова, 1988
Воронежская область	3.32	2.17	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Ходжаева, Семенов, 2015
Курская область	3.02 (1.84*)	1.52	Не опр.	Не опр.	2.81	Недбаев, Мальшева, 2018
Белгородская область	2.06	1.91	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Чендев и др., 2011
Тульская область	3.74	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Богатова, Щеглов, 2005
Среднее по России	4.05	3.29	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Урусевская и др., 2000
Среднее по России	4.50	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Орлов и др., 1996
Среднее по России	3.45	2.57	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Дядькина, 2016
Среднее	3.58	2.84	Не опр.	Не опр.	Не опр.	

Можно предположить, что заделка растительных остатков при вспашке и разрушение макроагрегатов способствуют более глубокому перераспределению по профилю почвы тонкодисперсного и растворимого органического вещества.

Из таблицы 1 видно, что более трети $C_{\text{орг}}$, аккумулированного в метровой толще серой лесной почвы, сосредоточено в верхнем 0–20 см (40% в целинной и 31% в пахотной почве). Превышение запасов $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое целинной почвы, по сравнению с пахотной, было не столь значительно, как это следовало из данных по валовому содержанию $C_{\text{орг}}$, а в нижних горизонтах пахотной почвы запасы $C_{\text{орг}}$ были даже выше, чем в целинной почве. Поэтому запасы $C_{\text{орг}}$ в 0–100 см слое пахотной почвы оказались на 15% больше, чем в целинной. Таким образом, потери органического вещества в длительно используемых в земледелии почвах присущи преимущественно пахотному горизонту. Следует строго придерживаться рекомендаций Д.С. Орлова (Орлов и др., 1996; Орлов и др., 2004) – сравнивать гумусное состояние целинных, залежных и пахотных почв, а также оценивать углерод-секвестрирующую эффективность различных технологий и мероприятий по запасам $C_{\text{орг}}$, а не по его содержанию в массе почвы.

Структурные пулы органического вещества серой лесной почвы. Твердые органические частицы (РОМ) и минерально-связанное органическое вещество (МАОМ) были отнесены к группе структурных пулов ПОВ (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023b). Эти пулы придают ПОВ целостность, отражают его автохтонность, обеспечивают сохранность органического углерода, выполняют депонирующую, агрегирующую, протекторную и другие функции. В гумусовых горизонтах целинной и пахотной серой лесной почвы в виде РОМ вместе с фракцией песка находилось 18 и 8% массы почвы соответственно (табл. 3), а на МАОМ вместе с пылью и глиной приходилось 82 и 92% (табл. 4).

В нижних горизонтах содержание фракции РОМ + песок уменьшалось до 3–6%, а МАОМ – увеличивалось до 94–97% от массы почвы. Концентрации углерода во фракциях РОМ и МАОМ коррелировали между собой ($r = 0.980$, $p = 0.001$) и с $C_{\text{орг}}$ в массе почвы ($r = 0.972$ и 0.993 при $p = 0.001$ и $p < 0.001$ соответственно).

Во фракции РОМ содержалось в 1.4–2.5 раза больше органического углерода, а отношение C/N было шире в 1.4–1.8 раза, чем в интактном образце почвы. В отличие от РОМ, концентрация углерода и отношение C/N во фракции МАОМ были соответственно в 1.1–1.4 и 1.2–1.3 раза меньше по сравнению с интактным образцом почвы.

Таблица 3. Распределение твердых органических частиц (РОМ) в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 3. Distribution of particulate organic matter (POM) in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	Фракция РОМ + песок, % от массы почвы	С _{РОМ} , % от массы фракции	C/N фракции РОМ	С _{РОМ} , г/кг почвы	С _{РОМ} , % от С _{орг}
<i>Мелколиственный лес</i>					
2–18	18 ± 1	3.70 ± 0.13	16.2 ± 0.9	6.53 ± 0.64	35
18–66	6 ± 2	0.95 ± 0.13	14.2 ± 0.8	0.53 ± 0.10	10
66–100	4 ± 1	0.47 ± 0.07	13.0 ± 0.4	0.20 ± 0.08	5
<i>Пашня</i>					
0–20	8 ± 1	3.07 ± 0.02	15.1 ± 0.5	2.44 ± 0.17	20
20–61	4 ± 1	0.98 ± 0.01	13.6 ± 1.6	0.43 ± 0.09	6
61–100	3 ± 1	0.75 ± 0.06	12.7 ± 1.4	0.20 ± 0.06	5

Пропорции C/N в РОМ и МАОМ относительно интактного образца почвы в верхнем горизонте серой лесной почвы составляли 1.44 : 0.78 : 1 в среднем для двух землепользований. В гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы и типичного чернозема разного землепользования эти соотношения равнялись 1.43 : 0.77 : 1 (Семенов и др., 2023с), а для почв луговых и лесных экосистем подчинялись пропорции 1.47 : 0.84 : 1 (Cotrufo et al., 2019). В нижних горизонтах чернозема типичного, серой лесной и дер-

ново-подзолистой почв соотношение C/N в POM, MAOM и в ин-
 тактном образце почвы соответствовало в среднем 1.70 : 0.72 : 1.

Таблица 4. Распределение минерально-ассоциированного органического вещества (MAOM) в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 4. Distribution of mineral-associated organic matter (MAOM) in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	Фракция MAOM + пыль + глина, % от массы почвы	C _{MAOM} , % от массы фракции	C/N фракции MAOM	C _{MAOM} , г/кг почвы	C _{MAOM} , % от C _{орг}
<i>Мелколиственный лес</i>					
2–18	82 ± 1	1.33 ± 0.02	9.0 ± 0.5	10.95 ± 0.20	59
18–66	94 ± 2	0.52 ± 0.02	6.8 ± 0.4	4.94 ± 0.15	88
66–100	96 ± 1	0.36 ± 0.03	5.6 ± 0.4	3.44 ± 0.29	91
<i>Пашня</i>					
0–20	92 ± 1	1.01 ± 0.04	8.0 ± 0.4	9.34 ± 0.36	77
20–61	96 ± 1	0.65 ± 0.01	7.0 ± 1.4	6.18 ± 0.09	89
61–100	97 ± 1	0.41 ± 0.02	5.5 ± 0.7	4.02 ± 0.19	93

Эти данные указывают на сходные и сопряженные пути формирования POM и MAOM в разных почвах, но сами фракции отличаются между собой по предшественникам, процессам образования, составу, механизмам стабилизации и состоянию присутствия в почве. Если POM образуется из растительных остатков, подвергающихся в почве фрагментированию, разложению и окклюждению (Семенов и др., 2019b; Cotrufo et al., 2022), то MAOM формируется параллельно с образованием POM путем “минерального и микробного насосов” (Liang, 2020; Liang et al., 2019; Xiao et al., 2023) из растворенного углерода растительного

происхождения и микробной некромассы, которые взаимодействуют с минеральными частицами почвы (Angst et al., 2023).

Фактические содержания углерода в пулах РОМ ($C_{\text{РОМ}}$) и МАОМ ($C_{\text{МАОМ}}$) устанавливаются по измеренным значениям массы гранулометрических фракций и содержания углерода в этих фракциях. Изменчивость $C_{\text{орг}}$ в профилях целинной и пахотной серой лесной почвы на 53% объяснялась пулом $C_{\text{МАОМ}}$ и на 50% пулом $C_{\text{РОМ}}$ ($C_{\text{орг}} = 1.14C_{\text{РОМ}} + 0.99C_{\text{МАОМ}} - 0.01$, при $R^2 = 0.999$, $n = 18$). По данным для трех почв (дерново-подзолистая, серая лесная, чернозем типичный) вклад $C_{\text{МАОМ}}$ в $C_{\text{орг}}$ составлял 64%, а $C_{\text{РОМ}} - 40\%$. В гумусовом горизонте серой лесной почвы целинного участка в пуле $C_{\text{РОМ}}$ содержалось 6.53 г/кг (35% от $C_{\text{орг}}$), а в пуле $C_{\text{МАОМ}} - 10.9$ г/кг (59% от $C_{\text{орг}}$) углерода соответственно (табл. 3 и 4). Для сравнения в гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы и типичного чернозема в пуле $C_{\text{РОМ}}$ содержалось соответственно 7.91 г/кг (38% от $C_{\text{орг}}$) и 17.7 г/кг (41% от $C_{\text{орг}}$) углерода, а в пуле $C_{\text{МАОМ}} - 11.6$ г/кг (56% от $C_{\text{орг}}$) и 22.7 г/кг (53% от $C_{\text{орг}}$) (Семенов и др., 2023с). Величины содержания $C_{\text{РОМ}}$ соответствуют значениям (от 2.10 до 18.7 г/кг почвы, от 20 до 48% от $C_{\text{орг}}$), полученным ранее для ряда зональных почв под естественными угодьями (Семенов и др., 2019а). Вниз по профилю серой лесной почвы содержание $C_{\text{РОМ}}$ уменьшалось в 12–32 раза, составляя 5–10% от $C_{\text{орг}}$. Распределение РОМ по профилю серой лесной почвы похоже на распределение биомассы корней, которые располагаются преимущественно в полуметровой толще. Содержание $C_{\text{МАОМ}}$ с глубиной уменьшалось всего лишь в 2–3 раза, при этом доля этого пула в ПОВ возрастала до 88–91% (табл. 4).

Обеднение пахотного горизонта серой лесной почвы органическим веществом, по сравнению с целинным участком, происходило в большей мере за счет РОМ, чем МАОМ. Содержание $C_{\text{РОМ}}$ в пахотном слое было в 2.7 раза меньше, чем в почве под лесом, а $C_{\text{МАОМ}} -$ только в 1.2 раза. Поэтому процент $C_{\text{МАОМ}}$ в органическом веществе пахотной серой лесной почве был выше, чем в почве под лесом. В предыдущих работах были получены следующие пределы обеднения пахотных почв твердыми органическими частицами: в дерново-подзолистой почве – в 4 раза, в серой лесной почве – в 3–3.2 раза, в черноземе – от 1.8 до 2.8 раз (Семенов

и др., 2019а; Семенов и др., 2023с). Убыль углерода минерально-ассоциированного органического вещества в пахотном слое в дерново-подзолистой почве составляла 2 раза, а в пахотном типичном черноземе уменьшение содержания $C_{\text{МАОМ}}$ было незначительным (Семенов и др., 2023с). Ранее было показано, что $C_{\text{МАОМ}}$ слабо чувствительно и к внесению органических удобрений. За 9 лет ежегодного применения органических удобрений содержание $C_{\text{МАОМ}}$ в серой лесной почве возросло в 1.3 раза, тогда как $C_{\text{РОМ}}$ – в 2.4–6.3 раз (Семенов и др., 2023а).

Предполагается (Just et al., 2023), что соотношение $C_{\text{РОМ}}$ к $C_{\text{МАОМ}}$ может быть индикатором стабильности ПОВ, допуская, что чем уже это соотношение, тем выше стабильность органического вещества. Соотношение $C_{\text{РОМ}}$ к $C_{\text{МАОМ}}$ в гумусовом горизонте серой лесной почвы под лесом равнялось 0.60, а под пашней – 0.26. В нижних горизонтах это соотношение уменьшалось до 0.05–0.06, в основном из-за низкой доли $C_{\text{РОМ}}$. В среднем для чернозема типичного, серой лесной и дерново-подзолистой почв на участках с естественной растительностью индекс $C_{\text{РОМ}}/C_{\text{МАОМ}}$ в гумусовом горизонте равнялся 0.69 ± 0.09 , в пахотном слое – 0.35 ± 0.10 , тогда как в нижнем горизонте целинной и пахотной почвы – соответственно 0.12 ± 0.06 и 0.10 ± 0.04 .

Таким образом, органическое вещество твердых частиц аккумулируется преимущественно в гумусовом горизонте серой лесной почвы и чувствительно к смене землепользования. Минерально-ассоциированное органическое вещество преобладает в составе ПОВ, особенно в нижних горизонтах почвенного профиля, и мало зависит от землепользования.

Процессные пулы органического вещества серой лесной почвы. Реактивность, трансформируемость и биоактивность ПОВ создаются процессными пулами потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0) и микробной биомассы ($C_{\text{МИК}}$) (Семенов и др., 2023а; Семенов и др., 2023с). Процессные пулы ответственны за физиологические, рециклирующие, эмиссионные и другие функции. В гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы содержалось 1.22 г/кг потенциально-минерализуемого углерода (табл. 5), столько же, сколько и в необрабатываемой дер-

ново-подзолистой почве, но меньше, чем в черноземе (Семенов и др., 2023с). Пахотная серая лесная почва содержала в 2 раза меньше C_0 , чем целинная, занимая промежуточное положение между используемыми в земледелии черноземом и дерново-подзолистой почвой.

Таблица 5. Содержание потенциально минерализуемого (C_0) и микробного ($C_{\text{мик}}$) углерода в профиле серой лесной почвы разного землепользования

Table 5. Potentially mineralizable (C_0) and microbial (C_{mic}) carbon contents in the profile of gray forest soil under different land use

Слой, см	C_0			$C_{\text{мик}}$		
	г/кг почвы	Константа скорости минера- лизации, сут ⁻¹	% от $C_{\text{орг}}$	г/кг почвы	% от $C_{\text{орг}}$	% от C_0
<i>Мелколистственный лес</i>						
2–18	1.22 ± 0.03	0.020 ± 0.000	6.6	0.29 ± 0.04	1.6	24
18–66	0.17 ± 0	0.022 ± 0.000	3.1	0.04 ± 0.01	0.8	25
66–100	0.08 ± 0	0.032 ± 0.000	2.1	0.03 ± 0.01	0.7	37
<i>Пашня</i>						
0–20	0.61 ± 0.02	0.021 ± 0.001	5.1	0.16 ± 0.02	1.3	26
20–61	0.17 ± 0.01	0.032 ± 0.002	2.4	0.05 ± 0.01	0.7	29
61–100	0.08 ± 0.01	0.040 ± 0.000	1.8	0.03 ± 0	0.7	38

Судя по проценту C_0 от $C_{\text{орг}}$ органическое вещество целинной серой лесной почвы было самым доступным для минерализации по сравнению с дерново-подзолистой почвой и типичным черноземом под естественными угодьями (6.6, 5.9 и 3.6% от $C_{\text{орг}}$ соответственно). Минерализуемость органического вещества в ряду пахотных почв уменьшалась в следующей последовательности: дерново-подзолистая > серая лесная > чернозем типичный

(5.6, 5.1 и 2.8% от $C_{\text{орг}}$ соответственно). Целинные серая лесная и дерново-подзолистая почвы характеризовались средней обеспеченностью C_0 , тогда как чернозем степного участка – высокой (Семенов и др., 2018). Пахотным аналогам серой лесной и дерново-подзолистой почв была свойственна низкая обеспеченность C_0 , а чернозема – средняя.

Размеры пула потенциально-минерализуемого углерода в нижних горизонтах целинной и пахотной серой лесной почв были соответственно в 7–15 и 4–8 раз меньше, чем в верхнем горизонте (табл. 5). Уменьшение минерализуемости органического вещества вниз по профилю серой лесной почвы, также как и в дерново-подзолистой почве и черноземе, свидетельствует о преобладании биологически стабильного органического вещества в нижних горизонтах, согласуясь с ранее полученными данными (Семенов и др., 2018; Ходжаева, Семенов, 2015).

Измеренное методом СИД содержание $C_{\text{мик}}$ в гумусовом горизонте серой лесной почвы под лесом (табл. 5) было близким таковым, полученным с помощью количественного определения дцДНК и метода фумигации-экстракции хлороформом в образцах серой лесной почвы под залежью и лесом на территории смежного ландшафта (Семенов и др., 2019с). В пахотном слое обрабатываемой серой лесной почвы содержалось в 1.8 раза меньше $C_{\text{мик}}$, чем в верхнем горизонте целинной почвы (табл. 5). На микробный пул $C_{\text{мик}}$ в серой лесной почве приходилось 24–38% от C_0 и 0.7–1.6% от $C_{\text{орг}}$, т. е. примерно столько, сколько обнаруживалось в дерново-подзолистой почве и в черноземе (15–37% от C_0 и 0.2–1.7% от $C_{\text{орг}}$ (Семенов и др., 2023с).

С увеличением глубины содержание $C_{\text{мик}}$ уменьшалось в 3.5–8.3 раз, а различия между землепользованиями по микробной биомассе нивелировались. Профильное распределение $C_{\text{мик}}$ в серой лесной почве и отклик на изменение землепользования были идентичны таковым в дерново-подзолистой почве и типичном черноземе (Никитин и др., 2019; Семенов и др., 2016; Семенов и др., 2019с; Семенов и др., 2023с). Показано, что биомасса грибов и бактерий отрицательно коррелировала с глубиной отбора проб по почвенному профилю дерново-подзолистой почвы (Никитин и др., 2019). В серой лесной почве в двух нижележащих горизонтах ко-

личество бактериальных клеток снижалось, по сравнению с поверхностным горизонтом в 3.0–6.7 раз, а численность метаболически активных клеток архей уменьшалась в нижележащих горизонтах в 1.5–3 раза (Семенов и др., 2019с). Полученные данные по профильному распределению архей и бактерий в серой лесной почве были сопоставимы с результатами, полученными для черноземов и бурых полупустынных почв (Семенов и др., 2019с; Семенов и др., 2016).

Запасы потенциально-минерализуемого и микробного углерода в 0–100 см слое целинной серой лесной почвы составляли 3.72 и 0.94 т/га соответственно, а в пахотной почве – 3.18 и 0.91 т/га. В отличие от запасов $C_{\text{орг}}$ пахотная почва оказалась реально обедненной потенциально-минерализуемым и микробным углеродом. Основное количество C_0 в целинной и пахотной серой лесной почве было сосредоточено в слое 0–20 см (61 и 51%, по сравнению со слоем 0–100 см). То же самое было характерно и для микробной биомассы (57 и 46% от запасов в слое 0–100 см). Ранее было предположено, что по запасам потенциально-минерализуемого органического вещества в слое 0–50 см можно предсказывать брутто-величину гетеротрофного дыхания почвы, исходя из того, что эмиссионные потери углерода из почвы не могут превышать его потенциально-минерализуемого количества, содержащегося в почве (Семенов и др., 2018). Судя по запасам C_0 в слоях 0–20 см и 0–50 см, эмиссионный потенциал целинной серой лесной почвы составляет 2.3 и 3.0 т/га, а пахотной почвы – 1.6 и 2.4 т/га. Для сравнения: годовая эмиссия C-CO₂ из серой лесной почвы под чистым паром составляла 2.3–3.3 т/га (Лопес де Гереню и др., 2018). Следовательно, величина потенциально-минерализуемого углерода в почве соизмерима с почвенным дыханием гетеротрофных микроорганизмов, использующих ПОВ. Более высокие размеры эмиссии C-CO₂ почвой с растениями вызваны дыханием корней и ассоциированного с ним ризомикробного сообщества, вклад которых в сумме может достигать до 77–83% (Лопес де Гереню и др., 2018).

Таким образом, измерение процессных пулов C_0 и $C_{\text{мик}}$ является способом биологического фракционирования ПОВ и позволяет оценивать эмиссионный потенциал почвы. Можно предполо-

жить, что эмиссионный потенциал почвы будет зависеть от минерализационной способности органического вещества структурных пулов РОМ и МАОМ, и, соответственно, от соотношения РОМ и МАОМ в составе ПОВ.

Минерализационная способность РОМ и МАОМ. В исследованиях последних лет пересматривается бытующее ранее представление о РОМ и МАОМ, как об облигатно лабильном и стабильном пулах соответственно (Angst et al., 2023). Оказалось, что в этих пулах присутствуют как биологически активные, так и химически инертные компоненты (Семенов и др., 2023с). Наличие корреляций $C_{РОМ}$ и $C_{МАОМ}$ с C_0 и $C_{мик}$, как показано выше, свидетельствует об участии этих структурных пулов ПОВ в формировании запасов потенциально-минерализуемого органического вещества в серой лесной почве. В одной из предыдущих работ минерализуемость фракции РОМ (C_0 -РОМ) в серой лесной почве и типичном черноземе была в 2.8–7.6 раз больше, чем интактного образца почвы, а вклад РОМ в потенциально-минерализуемый пул этих почв составлял 36–86% (Семенов и др., 2019а).

Во фракции РОМ + песок содержалось в 2.7–8.0 раза больше потенциально-минерализуемого углерода (C_0 -РОМ), чем в МОАМ + пыль + глина (C_0 -МАОМ), при этом константы скорости минерализации были примерно одинаковыми (табл. 6). Более сильная минерализация РОМ, по сравнению с МАОМ, обнаружена и в других работах (Benbi et al., 2014). C_0 -МАОМ теснее коррелировал с C_0 всей почвы, чем C_0 -РОМ, как в случае серой лесной почвы (соответственно $r = 0.999$ и $r = 0.859$), так и для трех почв в целом (соответственно $r = 0.992$, $p < 0.001$ и $r = 0.850$, $p = 0.007$). Масса пула РОМ в серой лесной почве была в 4.5–32 раз меньше массы МАОМ пула, но фактический вклад РОМ в потенциально-минерализуемый пул почвы, по сравнению с вкладом МАОМ пула, был меньше всего лишь в 1.7–4.2 раза (20–41 и 71–87% от C_0).

В образцах дерново-подзолистой почвы и чернозема вклад C_0 -РОМ в C_0 был меньше вклада C_0 -МАОМ в 1.0–1.6 раз. В среднем для трех почв потенциально-минерализуемый пул почвы на $41 \pm 13\%$ представлен фракцией РОМ и на $71 \pm 11\%$ – фракцией МАОМ.

Таблица 6. Размеры минерализуемого пула (C_0) и константа скорости минерализации (k) твердых органических частиц (ПОМ) и минерально-ассоциированного органического вещества (МАОМ) в серой лесной почве
Table 6. Mineralizable pool size (C_0) and mineralization rate constant (k) of particulate organic matter (ПОМ) and mineral-associated organic matter (МАОМ) in gray forest soil

Угодье, слой	C_0 фракции			C_0 фракции в перерасчете на всю почву		
	мг/100 г фракции	% от С фракции	k , сут ⁻¹	мг/100 г почвы	% от C_0 целой почвы	% от $C_{орг}$ целой почвы
ПОМ + песок						
Мелколиственный лес, 2–18 см	286 ± 10	7.7	0.021	50	41	2.7
То же, 18–66 см	59 ± 2	6.2	0.018	3	20	0.6
Пашня, 0–20 см	279 ± 1	9.1	0.017	22	36	1.8
То же, 20–61 см	120 ± 2	12.2	0.013	5	31	0.5
МАОМ + пыль + глина						
Мелколиственный лес, 2–18 см	105 ± 2	7.9	0.016	87	71	4.7
То же, 18–66 см	16 ± 0	3.0	0.029	15	85	2.6
Пашня, 0–20 см	50 ± 1	5.0	0.016	46	75	3.8
То же, 20–61 см	15 ± 0	2.4	0.015	15	87	1.5

Можно заметить, что суммарный вклад C_0 -РОМ и C_0 -МАОМ в C_0 всей почвы оказывается завышенным в среднем на 12%, чем при его определении в интактном образце. Это связано с дестабилизацией некоторой части защищенного органического вещества во фракциях РОМ и МАОМ при их гранулометрическом разделении, которое стало потенциально-минерализуемым (Семенов и др., 2015). В другой работе были получены более значительные превышения суммарной минерализации органического вещества трех гранулометрических фракций по сравнению с исходной почвой (Arevalo et al., 2012).

Таким образом, оба структурных пула РОМ и МАОМ содержат в себе биологически активное органическое вещество, способное к минерализации. Наши данные согласуются с выводом в работе (Yu et al., 2022), что РОМ и МАОМ вносят значительный вклад в разложение ПОВ, возможно, потому что РОМ и МАОМ имеют часто близкие характеристики минерализации и/или большой размер пула МАОМ может компенсировать его меньшую скорость разложения по сравнению с РОМ. Именно совокупный эффект РОМ и МАОМ пулов, а не какая-либо отдельная фракция ПОВ, создает эмиссионный потенциал почвы. Вклад в продукцию CO_2 небольшого $C_{РОМ}$ пула может быть ничуть не меньше, чем большого по размерам, но медленно оборачиваемого пула $C_{МАОМ}$.

Взаимосвязь структурных и процессных пулов ПОВ.

Размеры структурных и процессных пулов относительно валового содержания $C_{орг}$ в гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы соотносились ($C_{орг} : C_{МАОМ} : C_{РОМ} : C_0 : C_{мик}$) как 1 : 0.59 : 0.35 : 0.07 : 0.02, а в пахотном горизонте обрабатываемой почвы – 1 : 0.77 : 0.20 : 0.05 : 0.01. Для сравнения: в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве эти соотношения составляли соответственно 1 : 0.56 : 0.38 : 0.06 : 0.01 и 1 : 0.72 : 0.24 : 0.06 : 0.01, а в черноземе лугово-степной и сельскохозяйственной экосистем – 1 : 0.53 : 0.41 : 0.04 : 0.01 и 1 : 0.68 : 0.30 : 0.03 : 0.005. В нижнем горизонте серой лесной почвы соотношения между пулами были иными без особых различий между землепользованиями: в целинной – 1 : 0.91 : 0.05 : 0.02 : 0.01, а в пахотной – 1 : 0.93 : 0.05 : 0.02 : 0.01. То же самое было характерно и для нижних горизонтов це-

линных и пахотных угодий дерново-подзолистой почвы (1 : 0.89 : 0.16 : 0.04 : 0.01 и 1 : 0.84 : 0.11 : 0.04 : 0.01) и типичного чернозема (1 : 0.87 : 0.10 : 0.01 : 0.003 и 1 : 0.87 : 0.11 : 0.01 : 0.002). Из этих данных видно, что вид землепользования и глубина залегания в почвенном профиле оказывают более сильное влияние на соотношение углеродных пулов, чем тип почвы.

Содержание углерода в структурных и процессных пулах серой лесной почвы разных горизонтов и землепользований тесно коррелировало с общим $C_{\text{орг}}$ (табл. 7). Достоверными были связи содержаний углерода в пулах с $C_{\text{орг}}$ и в целом для трех зональных почв (табл. 7). Поэтому измерение пулов $C_{\text{МАОМ}}$, $C_{\text{РОМ}}$, C_0 и $C_{\text{мик}}$ должно стать обязательным этапом в мониторинге динамики ПОВ и в программах рекарбонизации почв агроэкосистем. Наличие корреляции между размерами пулов $C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$, как отдельно для серой лесной почвы, так и для трех зональных почв, указывает на общность исходного источника органического вещества для обоих этих пулов, которым являются растительные остатки, и на участие продуктов разложения РОМ в образовании МАОМ.

Достоверные, хотя и с разной теснотой, корреляции $C_{\text{РОМ}}$ и $C_{\text{МАОМ}}$ с C_0 подтверждают способность компонентов РОМ и МАОМ к минерализации (табл. 7). Судя по коэффициентам корреляции, РОМ более доступно для минерализации микроорганизмами, чем МАОМ, согласуясь с ранее полученными результатами (Семенов и др., 2019а; Семенов и др., 2023с; Cotrufo et al., 2019, Lavallee et al., 2020). Вместе с тем роль МАОМ в краткосрочном разложении ПОВ, вероятно, недооценивается (Yu et al., 2022). Твердые органические частицы быстро и полно осваиваются почвенными микроорганизмами, которые используют $C_{\text{РОМ}}$ для поддержания жизнедеятельности и на синтез новой биомассы (Xiao et al., 2017). Поэтому $C_{\text{РОМ}}$ достаточно тесно коррелировал с $C_{\text{мик}}$, как в образцах серой лесной почвы, так и дерново-подзолистой почвы и чернозема.

Связь между $C_{\text{МАОМ}}$ и $C_{\text{мик}}$ объясняется участием микробной некромассы в формировании МАОМ. В отличие от $C_{\text{РОМ}}$ связь $C_{\text{МАОМ}}$ и $C_{\text{мик}}$ была достоверной в дерново-подзолистой и в серой лесной почвах, а в черноземе она была незначимой.

Таблица 7. Корреляционная матрица зависимостей между размерами структурных и процессных пулов углерода в профилях зональных почв разного землепользования

Table 7. Correlation matrix of dependencies between sizes of structural and process carbon pools in profiles of zonal soils under different land use

Параметр	C _{орг}		C _{РОМ}		C _{МАОМ}		C ₀		C _{мик}	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
C _{орг}	$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.973}{0.922}$	$\frac{0.001}{<0.001}$	$\frac{0.976}{0.969}$	$\frac{0.001}{<0.001}$	$\frac{0.991}{0.791}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$	$\frac{0.991}{0.626}$	$\frac{<0.001}{0.005}$
C _{РОМ}			$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.900}{0.800}$	$\frac{0.014}{<0.001}$	$\frac{0.994}{0.912}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$	$\frac{0.990}{0.751}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$
C _{МАОМ}					$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.941}{0.651}$	$\frac{0.005}{0.003}$	$\frac{0.945}{0.494}$	$\frac{0.004}{0.037}$
C ₀							$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет	$\frac{0.999}{0.952}$	$\frac{<0.001}{<0.001}$
C _{мик}									$\frac{1}{1}$	<u>Нет</u> Нет

Примечание. Над чертой – серая лесная почва (n = 6), под чертой – дерново-подзолистая почва, серая лесная почва, типичный чернозем (n = 18).

Note. Above the line – gray forest soil (n = 6), below the line – soddy-podzolic soil, gray forest soil, typical chernozem (n = 18).

Очевидно, что оборот микробной биомассы в профиле типичного чернозема был не столь велик, чтобы изменить размеры МАОМ пула. Содержания C_0 и $C_{\text{мик}}$ тесно коррелировали между собой во всех трех зональных почвах. С одной стороны, почвенные микроорганизмы напрямую используют потенциально-минерализуемое органическое вещество, которое служит источником энергии и питания, с другой стороны, микробная некромаасса является наиболее доступным для минерализации субстратом.

Таким образом, между размерами структурных и процессных пулов в разных почвах обнаруживается определенная стехиометрия. Соотношения между пулами чувствительны к профильному расположению почвенных горизонтов и типу землепользования. Величины пулов коррелируют друг с другом и с общим $C_{\text{орг}}$, указывая на вовлеченность компонентов структурных и процессных пулов в оборот углерода и на возможность получения полного и разностороннего представления о качестве ПОВ путем подразделения его на пулы биологическими, физическими и химическими способами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серые лесные почвы являются значимым резервуаром органического углерода ($C_{\text{орг}}$). В зависимости от подтипа содержание $C_{\text{орг}}$ в гумусовом горизонте серых лесных почв целинных и залежных угодий на территории Российской Федерации варьирует от 1.24 до 5.16%, а в пахотном горизонте – от 0.70 до 4.74%. Подтипы серой лесной почвы отчетливо различаются по содержанию $C_{\text{орг}}$ в органогенном горизонте. Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в светло-серой лесной почве под естественными угодьями и под пашней составляет 2.16 ± 0.67 и $1.36 \pm 0.40\%$, в типичной серой лесной почве – 2.39 ± 0.61 и $1.72 \pm 0.40\%$, в темно-серой лесной почве – 3.58 ± 0.95 и $2.84 \pm 0.86\%$ соответственно. Одна из причин обеднения органическим углеродом верхнего слоя пахотных серых лесных почв – перераспределение органического вещества в подпахотные горизонты, вследствие чего запасы $C_{\text{орг}}$ в метровой толще пахотной почвы могут быть даже больше, чем в целинной почве.

В серой лесной почве в зависимости от глубины в профиле и

землепользования от 59 до 93% $C_{\text{орг}}$ представлено фракцией минерально-ассоциированного органического вещества (МАОМ), сосредоточенного в гранулометрической фракции < 0.05 мм. Соответственно, 5–35% $C_{\text{орг}}$ содержится в виде твердых органических частиц (РОМ) размером 0.05–2 мм. В пахотных почвах и в подповерхностных горизонтах доля $C_{\text{МАОМ}}$ в составе $C_{\text{орг}}$ увеличивается, а $C_{\text{РОМ}}$ – снижается. Массовое содержание углерода в структурных пулах нижних горизонтов не зависело от землепользования. Отношения $C : N$ в интактных образцах почвы, фракциях РОМ и МАОМ в поверхностных горизонтах разного землепользования равнялись 1 : 1.44 : 0.78 соответственно, а в нижних горизонтах – 1 : 1.70 : 0.72.

В процессных пулах целинной серой лесной почвы, представленных потенциально-минерализуемым органическим веществом (C_0) и микробной биомассой ($C_{\text{мик}}$) содержалось 6.6 и 1.6% от $C_{\text{орг}}$. Распределение углерода по профилю почвы процессных пулов, также как и структурных, было сходным с общим $C_{\text{орг}}$. Верхний слой пахотной почвы обеднен C_0 и $C_{\text{мик}}$ соответственно в 2 и 1.8 раз по сравнению с целинной. До 24–38% потенциально-минерализуемого органического вещества серой лесной почвы могло быть представлено микробной биомассой. Массовое содержание углерода в процессных пулах нижних горизонтов почвы было одинаковым при обоих землепользованиях.

Размеры структурных и процессных пулов относительно валового содержания $C_{\text{орг}}$ в гумусовом горизонте целинной серой лесной почвы соотносились ($C_{\text{орг}} : C_{\text{МАОМ}} : C_{\text{РОМ}} : C_0 : C_{\text{мик}}$) как 1 : 0.59 : 0.35 : 0.07 : 0.02, а в пахотном горизонте обрабатываемой почвы – 1 : 0.77 : 0.20 : 0.05 : 0.01. В нижнем горизонте серой лесной почвы соотношения между пулами были иными без особых различий между землепользованиями. Размеры структурных и процессных пулов ПОВ коррелировали друг с другом и с $C_{\text{орг}}$.

Фракции РОМ и МАОМ содержат потенциально-минерализуемые компоненты (6.2–12.2 и 2.4–7.9% от массы РОМ и МАОМ соответственно). Процентная доля потенциально-минерализуемого углерода в структурных пулах меняется с глубиной почвенного слоя и практически не зависит от землепользования. Потенциально-минерализуемый пул органического веще-

ства серой лесной почвы на 20–41% представлен фракцией твердых органических частиц и на 71–87% фракцией минерально-ассоциированного органического вещества. Определение потенциально-минерализуемого углерода в почве является способом верификации полевых оценок гетеротрофного источника в годовом потоке CO₂, а измерение пулов структурных и процессных пулов должно стать обязательным этапом в мониторинге динамики ПОВ и при оценке эффективности приемов по рекарбонизации почв агроэкосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова А.Б., Иванов Д.В., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Марасов А.А., Паймикина Э.Е., Рупова Э.Х.* Динамика содержания гумуса и его запасов в почвах Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2015. № 3. С. 13–17.
2. *Алифанов В.М.* Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушино: ОНТИ НЦБИ РАН, 1995. 318 с.
3. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г.* Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.
4. *Артемьева З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
5. *Артемьева З.С., Травникова Л.С.* Изменение характеристик органического вещества и глинистых минералов серых почв в процессе агропедогенеза // Почвоведение. 2006. № 1. С. 96–107.
6. *Ахтырцев Б.П.* Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1979. 231 с.
7. *Ахтырцев Б.П., Ефанова Е.В.* Изменение свойств и плодородия темно-серых лесостепных почв юга-востока Окско-Донской низменности при интенсивном сельскохозяйственном использовании // Плодородие почв Среднерусской лесостепи и пути регулирования. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1988. С. 49–60.
8. *Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудеяров В.Н.* Физические свойства и изменение запасов углерода Серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 345–353. DOI: [10.7868/S0032180X17030029](https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029).
9. *Богатова М.К., Щеглов Д.И.* Органическое вещество в профиле темно-серых лесных почв под различными типами фитоценозов

Тульской области // Вестник Воронежского университета. Серия: Химия, Биология, Фармация. 2005. № 2. С. 121–125.

10. *Гришина Л.А.* Гумусообразование и гумусное состояние почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.

11. *Дядькина С.Е.* Содержание гумуса в верхнем горизонте серых лесных почв по литературным источникам 1963–2010 годов // Почвоведение – основа продовольственной и экологической безопасности страны. Часть II. Москва-Белгород: Издательский дом “Белгород”, 2016. С. 248–249.

12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.

13. *Ерёмин Д.И., Груздева Н.А., Ерёмин Д.В.* Изменение гумусового состояния серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато под действием длительной распашки // Почвоведение. 2018. № 7. С. 826–835. DOI: [10.1134/S0032180X18070110](https://doi.org/10.1134/S0032180X18070110).

14. *Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемьева З.С., Козут Б.М.* Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1480. DOI: [10.31857/S0032180X21120169](https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169).

15. *Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В.* Эколого-гидрологическая оценка светло-серых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом // Почвоведение. 1994. № 1. С. 116–127.

16. *Зинякова Н.Б., Ходжаева А.К., Тулина А.С., Семенов В.М.* Активное органическое вещество в серой лесной почве пахотных и залежных земель // Агрохимия. 2013. № 9. С. 3–14.

17. *Иванов П.А., Кузин Е.Н.* Изменение плодородия серой лесной почвы под влиянием химической и биологической мелиорации // Земледелие. 2009. № 1. С. 18–20.

18. *Иванова Т.Н., Багаутдинов Ф.Я., Кулинецова Е.П.* Гумусовое состояние серых лесных почв Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Аграрная наука в инновационном развитии АПК. Часть I. Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. С. 79–83.

19. *Исмаилова Н.Х.* Изменение содержания и качества органического вещества в агросерых почвах Нечерноземной зоны в зависимости от антропогенного воздействия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 13–22. DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-13-22](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-13-22).

20. *Ковалев И.В., Семенов В.М., Ковалева Н.О., Лебедева Т.Н., Яковлева В.М., Паутова Н.Б.* Оценка биогенности и биоактивности агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв // Почвоведение. 2021. № 7. С. 827–837. DOI: [10.31857/S0032180X21070078](https://doi.org/10.31857/S0032180X21070078).

21. *Козут Б.М.* Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944–952.
22. *Козут Б.М., Семенов В.М.* Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе // Агрохимия. 2015. № 12. С. 3–19.
23. *Кодочилова Н.А., Бузынина Т.С., Варламова Л.Д., Катерова Е.А.* Влияние систематического внесения минеральных удобрений и длительного последствия известкования на органическое вещество светло-серой лесной почвы // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21(2). С. 160–168. DOI: [10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168).
24. *Комарова Н.А., Козлова Л.М.* Изменение содержания гумуса в светло-серой лесной почве под влиянием различных паров // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016. № 3. С. 5–14.
25. *Липатов Д.Н., Лыжин В.А., Вежливецва Л.А.* Пространственное распределение и многолетняя динамика содержания гумуса в агроландшафтах Тульской области // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 3. С. 35–41.
26. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А.* Влияние контрастных режимов увлажнения на эмиссию CO₂ из серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1244–1258. DOI: [10.1134/S0032180X18100039](https://doi.org/10.1134/S0032180X18100039).
27. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Щенисенко Е.А., Нефедова Т.Т.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
28. *Недбаев В.Н., Мальшиева Е.В.* Содержание гумуса в темно-серых лесных почвах и его трансформация в агроландшафтах Центрально-Черноземной зоны // Вестник Курской ГСХА. 2018. № 8. С. 65–70.
29. *Никитин Д.А., Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К., Никитина С.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Кутовая О.В.* Сезонная динамика биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1356–1364. DOI: [10.1134/S0032180X19110078](https://doi.org/10.1134/S0032180X19110078).
30. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Изменение содержания гумуса на серых лесных почвах при длительном применении удобрений // Российская сельскохозяйственная наука. 2016. № 1. С. 21–26.
31. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
32. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.

33. *Пивоварова Е.Г., Кононцева Е.В., Хлуденцов Ж.Г., Домникова Е.Ю.* Оценка современного состояния серых лесных почв умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края // Вестник Алтайского ГАУ. 2014. № 12. С. 55–60.
34. *Полякова Н.В.* Гумусное состояние пахотных серых лесных почв // Плодородие. 2007. № 1. С. 19–20.
35. *Полякова Н.В., Платонычева Ю.Н., Володина Е.Н.* Особенности почвообразования в серых лесных почвах под влиянием антропогенного фактора // Плодородие. 2011. № 4. С. 32–34.
36. Почвы Московской области и их использование. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2002. Т. 1. 500 с.
37. *Рябинина О.В.* Оценка свойств серой лесной почвы под посевами многолетних трав // Вестник ИРГСХА. 2012. № 52. С. 21–28.
38. *Семенов В.М., Журавлев Н.С., Тулина А.С.* Минерализация органического вещества в серой лесной почве и типичном черноземе, обесструктуренных физическими воздействиями // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1254–1266. DOI: [10.7868/S0032180X1510010X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1510010X).
39. *Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В.* Структурно–функциональное состояние органического вещества почвы // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Москва: Наука, 2006. С. 230–247.
40. *Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. DOI: [10.7868/S0032180X1804007X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X).
41. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Соколов Д.А.* Размеры и соотношения пулов органического углерода в серой лесной почве при многолетнем применении минеральных и органических удобрений // Почвоведение. 2023а. № 4. С. 482–501. DOI: [10.31857/S0032180X22601426](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601426).
42. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Хромычкина Д.П., Соколов Д.А., Лопес де Гереню В.О., Кравченко И.К., Ли Х., Семенов М.В.* Зависимость разложения органического вещества почвы и растительных остатков от температуры и влажности в длительных инкубационных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 860–875. DOI: [10.31857/S0032180X22070085](https://doi.org/10.31857/S0032180X22070085).
43. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсянян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н.* Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023б. Т. 6. № 1. e199. DOI: [10.31251/pos.v6i1.199](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199).

44. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019а. № 4. С. 440–450. DOI: [10.1134/S0032180X19040130](https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130).
45. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Зинякова Н.Б., Лопес де Гереню В.О., Семенов М.В. Измерение почвенных пулов органического углерода, выделенных био-физико-химическими способами фракционирования // Почвоведение. 2023с. № 9. С. 1155–1172. DOI: [10.31857/S0032180X23600427](https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427).
46. Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019b. № 10. С. 1172–1184. DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113).
47. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л. Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах правобережья р. Оки // Почвоведение. 2019с. № 8. С. 974–985. DOI: [10.1134/S0032180X19080124](https://doi.org/10.1134/S0032180X19080124).
48. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Степанов А.Л. Распределение метаболически активных представителей прокариот (архей и бактерий) по профилям чернозема и бурой полупустынной почвы // Почвоведение. 2016. № 2. С. 239–248. DOI: [10.7868/S0032180X16020106](https://doi.org/10.7868/S0032180X16020106).
49. Соколов Д.А., Дмитриевская И.И., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Черников В.А., Семенов В.М. Исследование стабильности почвенного органического вещества методами дериватографии и длительной инкубации // Почвоведение. 2021. № 4. С. 407–419. DOI: [10.31857/S0032180X21040146](https://doi.org/10.31857/S0032180X21040146).
50. Сорокина О.А. Оценка трансформации плодородия серых почв по степени гумусированности // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3(138). С. 240–246.
51. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536. DOI: [10.31857/S0032180X20120138](https://doi.org/10.31857/S0032180X20120138).
52. Титова В.И., Артемьева З.С., Архангельская А.М. Агрогенная трансформация органического вещества светло-серой лесной легкосуглинистой почвы (по исследованиям в длительном опыте) // Известия ТСХА. 2013. Вып. 3. С. 18–30.

53. *Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С.* Географо-генетические особенности гумусового состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1377–1390.
54. *Ушаков Р.Н.* Качественный состав гумуса серой лесной почвы при внесении удобрений // Плодородие. 2007. № 1. С. 17–18.
55. *Хабиров И.К.* Экология и биохимия азота в почвах Приуралья. Уфа: УНЦ РАН, 1993. 224 с.
56. *Хабиров И.К., Габбасова И.М., Хазиев Ф.Х.* Устойчивость почвенных процессов. Уфа: БГАУ, 2001. 327 с.
57. *Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504. DOI: [10.7868/S0032180X15120102](https://doi.org/10.7868/S0032180X15120102).
58. *Чендев Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С., Смирнова Л.Г., Новых Л.Л., Долгих А.В.* Антропогенная эволюция серых лесостепных почв южной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2011. № 1. С. 3–15.
59. *Чендев Ю.Г.* Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.
60. *Чимитдоржиева Г.Д.* Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. 388 с.
61. *Шпедт А.А., Трубников Ю.Н.* Оценка скорости изменения гумусового состояния дерново-подзолистых и серых лесных почв в условиях залежи // Управление почвенным плодородием и питание культурных растений. Омск: ЛИТЕРА, 2015. С. 185–190.
62. *Якименко В.Н., Конарбаева Г.А.* Трансформация фонда тяжелых металлов серой лесной почвы в агроценозе // Агрохимия. 2016. № 4. С. 61–69.
63. *Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W.* Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key // Nature Communications. 2023. Vol. 14. Art. No. 2967. DOI: [10.1038/s41467-023-38700-5](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5).
64. *Arevalo C.B.M., Chang S.X., Bhatti J.S., Sidders D.* Mineralization Potential and Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon under Different Land Uses in the Parkland Region of Alberta, Canada // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. Vol. 76(1). P. 241–251. DOI: [10.2136/sssaj2011.0126](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0126).
65. *Begill N., Don A., Poeplau C.* No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils // Global Change Biol. 2023. Vol. 29(16). P. 4662–4669. DOI: [10.1111/gcb.16804](https://doi.org/10.1111/gcb.16804).
66. *Benbi D.K., Boparai A.K., Brar K.* Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic

- matter // *Soil Biol. Biochem.* 2014. Vol. 70. P. 183–192. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.12.032](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.032).
67. *Cambardella C.A., Elliott E.T.* Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. Vol. 56(3). P. 777–783. DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).
68. *Cotrufo M.F., Haddix M.L., Kroeger M.E., Stewart C.E.* The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 168. Art. No. 108648. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108648](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648).
69. *Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nature Geoscience.* 2019. Vol. 12. P. 989–994. DOI: [10.1038/s41561-019-0484-6](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6).
70. *Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global Change Biol.* 2013. Vol. 19(4). P. 988–995. DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).
71. *Derrien D., Barré P., Basile - Doelsch I., Cécillon L., Chabbi A., Crème A., Fontaine S., Henneron L., Janot N., Lashermes G., Quénéa K., Rees F., Dignac M.F.* Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review // *Agronomy Sust. Develop.* 2023. Vol. 43. Art. No. 21. DOI: [10.1007/s13593-023-00876-x](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00876-x).
72. *Dobarco M.R., Wadoux A.M.J-C., Malone B., Minasny B., McBratney A.B., Searle R.* Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty // *Biogeosciences.* 2023. Vol. 20. P. 1559–1586. DOI: [10.5194/bg-20-1559-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023).
73. *Haddix M.L., Gregorich E.G., Helgason B.L., Janzen H., Ellert B.H., Cotrufo M.F.* Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil // *Geoderma.* 2020. Vol. 363. Art. No. 114160. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114160](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160).
74. *Just C., Armbruster M., Barkusky D., Baumecker M., Diepolder M., Döring T.F., Heigl L., Honermeier B., Jate M., Merbach I., Rusch C., Schubert D., Schulz F., Schweitzer K., Seidel S., Sommer M., Spiegel H., Thumm U., Urbatzka P., Zimmer J., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M.* Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as derived from particulate and mineral-associated organic matter // *Geoderma.* 2023. Vol. 434. Art. No. 116472. DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116472).

75. *Just C., Poeplau C., Don A., van Wesemael B., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M.* A simple approach to isolate slow and fast cycling organic carbon fractions in Central European Soils – importance of dispersion method // *Front. Soil Sci.* 2021. Vol. 1. Art. No. 692583. DOI: [10.3389/fsoil.2021.692583](https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.692583).
76. *Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S.* Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management // *Understanding and fostering soil carbon sequestration*. Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022. P. 1–36. DOI: [10.19103/AS.2022.0106.02](https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02).
77. *Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F.* Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Global Change Biol.* 2020. Vol. 26(1). P. 261–273. DOI: [10.1111/gcb.14859](https://doi.org/10.1111/gcb.14859).
78. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
79. *Liang C.* Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal // *Soil Ecol. Lett.* 2020. Vol. 2. P. 241–254. DOI: [10.1007/s42832-020-0052-4](https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4).
80. *Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M.* Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter // *Global Change Biol.* 2019. Vol. 25(11). P. 3578–3590. DOI: [10.1111/gcb.14781](https://doi.org/10.1111/gcb.14781).
81. *Lugato E., Lavallee J.M., Haddix M.L., Panagos P., Cotrufo M.F.* Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 295–300. DOI: [10.1038/s41561-021-00744-x](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x).
82. *Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F. et al.* Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 125. P. 10–26. DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025).
83. *Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I., Höschen C., Schweizer S.A., Buegger F., Pouteau V., Chenu C., Mueller C.W.* Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. No. 4115. DOI: [10.1038/s41467-021-24192-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8).
84. *Xiao K.Q., Zhao Y., Liang C., Zhao M., Moore O.W., Otero-Fariña A., Zhu Y.G., Johnson K., Peacock C.L.* Introducing the soil mineral carbon pump // *Nature Rev. Earth Environ.* 2023. DOI: [10.1038/s43017-023-00396-y](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y).
85. *Xiao W., Feng S., Liu Z., Su Y., Zhang Y., He X.* Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils // *Soil Biol. Biochem.* 2017. Vol. 107. P. 85–93. DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.12.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.025).

86. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 172. Art. No. 108756. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108756](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756).

REFERENCES

1. Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Malanin V.V., Khasanov R.R., Marasov A.A., Pajmikina E.E., Rupova E.H., Dinamika sodержaniya gumusa i ego zapasov v pochvah Respubliki Tatarstan (Dynamics of humus content and its reserves in the soils of the Republic of Tatarstan), *Rossijskij zurnal prikladnoj ekologii*, 2015, No. 3, pp. 13–17.
2. Alifanov V.M., *Paleokriogenez i sovremennoe pochvoobrazovanie* (Paleocryogenesis and modern soil formation), Pushchino, ONTI NCBI RAN, 1995, 318 p.
3. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Gavrilenko E.G., Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44(11), pp. 1215–1221, DOI: [10.1134/S1064229311030021](https://doi.org/10.1134/S1064229311030021).
4. Artem'eva Z.S., *Organicheskoe veshchestvo i granulometricheskaya sistema pochvy* (Organic matter and granulometric system of the soil), Moscow: GEOS, 2010, 240 p.
5. Artem'eva Z.S., Travnikova L.S., Transformation of organic matter and clay minerals in cultivated gray forest soils, *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No. 1, pp. 84–94.
6. Akhtyrcev B.P., *Serye lesnye pochvy Central'noj Rossii* (Gray forest soils of Central Russia), Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1979, 231 p.
7. Akhtyrcev B.P., Efanova E.V., Izmenenie svojstv i plodorodiya temnoseryh lesostepnyh pochv yuga-vostoka Oksko-Donskoj nizmennosti pri intensivnom zemledel'cheskom ispol'zovanii (Changes in the Properties and Fertility of Dark Gray Forest-Steppe Soils in the South-East of the Oka-Don Lowland under Intensive Agricultural Use), In: *Plodorodie pochv Srednerusskoj lesostepi i puti regulirovaniya*, Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo universiteta, 1988, pp. 49–60.
8. Baeva Y.I., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kuderyarov V.N., 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(3), pp. 327–334, DOI: [10.1134/S1064229317030024](https://doi.org/10.1134/S1064229317030024).

9. Bogatova M.K., Shcheglov D.I., Organicheskoe veshchestvo v profile temno-seryh lesnyh pochv pod razlichnymi tipami fitocenozov Tul'skoj oblasti (Organic matter in the profile of dark gray forest soils under various types of phytocenoses in the Tula region), *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Himiya, Biologiya, Farmaciya*, 2005, No. 2, pp. 121–125.
10. Grishina L.A., Gumusoobrazovanie i gumusnoe sostoyanie pochv (*Humus formation and humus state of soils*), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986, 244 p.
11. Dyad'kina S.E., Soderzhanie gumusa v verhnem gorizonte seryh lesnyh pochv po literaturnym istochnikam 1963–2010 godov (Humus content in the upper horizon of gray forest soils according to literary sources of 1963-2010), *Pochvovedenie – osnova prodovol'stvennoj i ekologicheskoy bezopasnosti strany*, Part II, Moskva-Belgorod: Izdatel'skij dom “Belgorod”, 2016, pp. 248–249.
12. Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii (*Unified State Register of Soil Resources of Russia*), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva Rossel'hoz akademii, 2014, 768 p.
13. Eremin D.I., Gruzdeva N.A., Eremina D.V., Izmenenie gumusovogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv vostochnoj okrainy Zaural'skogo plato pod dejstviem dlitel'noj raspashki (Changes in the Humus Status of Gray Forest Soils in the Eastern Outskirts of the Trans-Ural Plateau under the Effect of Long-Term Plowing), *Pochvovedenie*, 2018, No. 7, pp. 826–835, DOI: [10.1134/S0032180X18070110](https://doi.org/10.1134/S0032180X18070110).
14. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M., Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54(12), pp. 1826–1854, DOI: [10.1134/S1064229321120164](https://doi.org/10.1134/S1064229321120164).
15. Zaidelman F.R., Kovalev I.V., Ekologo-gidrologicheskaya ocenka svetloseryh ogleennyh pochv, osushennyh bestranshejnym i transhejnym drenazhom (Ecological-hydrological evaluation of light gray gleyed soils drained by trench and non-trench drainage), *Pochvovedenie*, 1994, No. 1, pp. 116–127.
16. Zinyakova N.B., Hodzhaeva A.K., Tulina A.S., Semenov V.M., Aktivnoe organicheskoe veshchestvo v seroj lesnoj pochve pahotnyh i zaleznyh zemel' (Active Organic Matter in the Gray Forest Soil of Arable and Fallow Lands), *Agrokhimiya*, 2013, No. 9, pp. 3–14.
17. Ivanov P.A., Kuzin E.N., Izmenenie plodorodiya seroj lesnoj pochvy pod vliyaniem himicheskoy i biologicheskoy melioracii (Changes in the gray forest soil fertility under the influence of chemical and biological melioration), *Zemledelie*, 2009, No. 1, pp. 18–20.
18. Ivanova T.N., Bagautdinov F.Ya., Kulintseva E.P., Gumusovoe sostoyanie seryh lesnyh pochv Predural'ya pri razlichnom sel'skohozyajstvennom

ispol'zovaniy (Humus status of grey forest soils in Preduralie various agricultural use), *Agrarnaya nauka v innovacionnom razvitiy APK*, Part I, Ufa: Bashkirskiy GAU, 2015, pp. 79–83.

19. Ismagilova N.H., Changes in the Content and Quality of Organic Matter in Agro-Gray Soils of the Non-Chernozem Zone Depending on Anthropogenic Impact, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2010, No. 65, pp. 13–22, DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-13-22](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-13-22).

20. Kovalev I.V., Semenov V.M., Kovaleva N.O., Lebedeva T.N., Yakovleva V.M., Pautova N.B., Estimation of the Biogenicity and Bioactivity of Gleyed Agrogray Nondrained and Drained Soils, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54(7), pp. 1059–1067, DOI: [10.1134/S1064229321070073](https://doi.org/10.1134/S1064229321070073).

21. Kogut B.M., Assessment of the humus content in arable soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45(9), pp. 843–851, DOI: [10.1134/S1064229312090062](https://doi.org/10.1134/S1064229312090062).

22. Kogut B.M., Semenov V.M., Evolyuciya dominiruyushchih paradig v uchenii o gumuse i pochvennom organicheskom veshchestve (Evolution of the Dominant Paradigms in the Theory of Humus and Soil Organic Matter), *Agrokhimiya*, 2015, No. 12, pp. 3–19.

23. Kodochilova N.A., Buzynina T.S., Varlamova L.D., Katerova E.A., Vliyanie sistematicheskogo vneseniya mineral'nyh udobrenij i dlitel'nogo posledejstviya izvestkovaniya na organicheskoe veshchestvo svetlo-seroj lesnoj pochvy (Effect of systematic application of mineral fertilizers and long-term aftereffect of liming on the organic matter of light-grey forest soil), *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2020, Vol. 21(2), pp. 160–168, DOI: [10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.160-168).

24. Komarova N.A., Kozlova L.M., Izmenenie soderzhaniya gumusa v svetlo-seroj lesnoj pochve pod vliyaniem razlichnyh parov (Changes in humus content in light-gray forest soil as influenced by various fallows), *Sibirskij vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki*, 2016, No. 3, pp. 5–14.

25. Lipatov D.N., Lyzhin V.A., Vezhlivceva L.A. Prostranstvennoe raspredelenie i mnogoletnyaya dinamika soderzhaniya gumusa v agrolandshaftah Tul'skoj oblasti (Spatial distribution and long-term dynamics of humus content in agricultural landscapes of the Tula region), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2005, No. 3, pp. 35–41.

26. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Khoroshaev D.A., The Effect of Contrasting Moistening Regimes on CO₂ Emission from the Gray Forest Soil under a Grass Vegetation and Bare Fallow, *Eurasian Soil Sci.*, 2018, Vol. 51(10), pp. 1200–1213, DOI: [10.1134/S1064229318100034](https://doi.org/10.1134/S1064229318100034).

27. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Shchenisenko E.A., Nefedova T.T., *Dinamika sel'skohozyajstvennyh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochvy* (Dynamics of agricultural

lands in Russia in the 20th century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils), Moscow: GEOS, 2010, 416 p.

28. Nedbaev V.N., Malysheva E.V., Soderzhanie gumusa v temno-seryh lesnyh pochvah i ego transformaciya v agrolandshaftah Central'no-Chernozemnoj zony (The humus content in dark gray forest soils and its transformation in the agricultural landscapes of the Central Black Earth zone), *Vestnik Kurskoj GSKHA*, 2018, No. 8, pp. 65–70.

29. Nikitin D.A., Chernov T.I., Zhelezova A.D., Tkhakakhova A.K., Nikitina S.A., Semenov M.V., Xenofontova N.A., Kutovaya O.V., Seasonal Dynamics of Microbial Biomass in Soddy-Podzolic Soil, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52(11), pp. 1414–1421, DOI: [10.1134/S1064229319110073](https://doi.org/10.1134/S1064229319110073).

30. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Fenova O.A., Izmenenie sodержaniya gumusa na seryh lesnyh pochvah pri dlitel'nom primenenii udobrenij (Change the content of humus on gray forest soils with long-term use of fertilizers), *Rossijskaya sel'skohozyajstvennaya nauka*, 2016, No. 1, pp. 21–26.

31. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S., Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoyaniya pochv i ih geneticheskikh gorizontov (Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.

32. Orlov D.S., Biryukova O.N., Suhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossijskoj Federacii* (Organic matter of soils in the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 256 p.

33. Pivovarova E.G., Konontseva E.V., Khludencov J.G., Domnikova E.Y., Ocenka sovremennogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv umerenno zasushlivoj i kolochnoj stepi Altajskogo kraja (*The evaluation of the current state of gray forest soils of temperately arid and forest-outlier steppe of the Altai region*), *Vestnik Altajskogo GAU*, 2014, No. 12, pp. 55–60.

34. Polyakova N.V., Gumusnoe sostoyanie pahotnyh seryh lesnyh pochv (Humus state of arable gray forest soils), *Plodorodie*, 2007, No. 1, pp. 19–20.

35. Polyakova N.V., Platonycheva Y.N., Volodina E.N., Osobennosti pochvoobrazovaniya v seryh lesnyh pochvah pod vliyaniem antropogennogo faktora (Pedogenesis features in gray forest soils under the effect of anthropogenic factor), *Plodorodie*, 2011, No. 4, pp. 32–34.

36. *Pochvy Moskovskoj oblasti i ih ispol'zovanie* (Soils of the Moscow region and their use), Moscow: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2002, Vol. 1, 500 p.

37. Ryabinina O.V., Ocenka svojstv seroj lesnoj pochvy pod posevami mnogoletnih trav (Evaluation of the gray forest soil properties for planting perennial plants), *Vestnik IrGSKHA*, 2012, No. 52, pp. 21–28.

38. Semenov V.M., Zhuravlev N.S., Tulina A.S., Mineralization of Organic Matter in Gray Forest Soil and Typical Chernozem with Degraded Structure due to Physical Impacts, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(10), pp. 1136–1148, DOI: [10.1134/S1064229315100105](https://doi.org/10.1134/S1064229315100105).
39. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Strukturno–funktional'noe sostoyanie organicheskogo veshchestva pochvy (Structural-functional status of soil organic matter), In: *Pochvennyye processy i prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochv* (Soil processes and time and spatial organization of soils), Moscow: Nauka, 2006, pp. 230–247.
40. Semenov V.M., Kogut B.M., Zinyakova N.B., Masyutenko N.P., Malyukova L.S., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Biologically Active Organic Matter in Soils of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 434–447, DOI: [10.1134/S1064229318040117](https://doi.org/10.1134/S1064229318040117).
41. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Sokolov D.A., Sizes and Ratios of Organic Carbon Pools in Gray Forest Soil under Long-Term Application of Mineral and Organic Fertilizers, *Eurasian Soil Sci.*, 2023a, Vol. 56(4), pp. 470–487, DOI: [10.1134/S1064229322602517](https://doi.org/10.1134/S1064229322602517).
42. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Khromychkina D.P., Sokolov D.A., Lopes de Gerenyu V.O., Kravchenko I.K., Li H., Semenov M.V., Dependence of Soil Organic Matter and Plant Residues Decomposition on Temperature and Moisture in the Long-Term Incubation Experiments, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55(7), pp. 926–939, DOI: [10.1134/S1064229322070080](https://doi.org/10.1134/S1064229322070080).
43. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N., Puly i frakcii organicheskogo ugleroda v pochve: struktura, funkcii i metody opredeleniya (Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination), In: *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2023b, Vol. 6, No. 1, e199, DOI: [10.31251/pos.v6i1.199](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199).
44. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Pautova N.B., Particulate Organic Matter in Noncultivated and Arable Soils, *Eurasian Soil Science*, 2019a, Vol. 52(4), pp. 396–404, DOI: [10.1134/S1064229319040136](https://doi.org/10.1134/S1064229319040136).
45. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Sokolov D.A., Zinyakova N.B., Lopes de Gerenyu V.O., Semenov M.V., Measurement of the Soil Organic Carbon Pools Isolated Using Bio-Physical-Chemical Fractionation Methods, *Eurasian Soil Science*, 2023c, Vol. 56(9), pp. 1327–1342, DOI: [10.1134/S1064229323601154](https://doi.org/10.1134/S1064229323601154).
46. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromychkina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O., Plant Residues Decomposition and Formation of Active Organic Matter in the Soil of the Incubation Experiments,

Eurasian Soil Science, 2019b, Vol. 52(10), pp. 1183–1194, DOI: [10.1134/S1064229319100119](https://doi.org/10.1134/S1064229319100119).

47. Semenov M.V., Manucharova N.A., Krasnov G.S., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Biomass and Taxonomic Structure of Microbial Communities in Soils of the Right-Bank Basin of the Oka River, *Eurasian Soil Sci.*, 2019c, Vol. 52, pp. 971–981, DOI: [10.1134/S106422931908012X](https://doi.org/10.1134/S106422931908012X).

48. Semenov M.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L., Distribution of metabolically active prokaryotes (Archaea and Bacteria) throughout the profiles of chernozem and brown semidesert soil, *Eurasian Soil Sci.*, 2016, Vol. 49(2), pp. 217–225, DOI: [10.1134/S1064229316020101](https://doi.org/10.1134/S1064229316020101).

49. Sokolov D.A., Dmitrevskaya I.I., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Chernikov V.A., Semenov V.M., A study of soil organic matter stability using derivatography and long-term incubation methods, *Eurasian soil science*, 2021, Vol. 54(4), pp. 487–498, DOI: [10.1134/S1064229321040141](https://doi.org/10.1134/S1064229321040141).

50. Sorokina O.A., Ocenka transformacii plodorodiy seryh pochv po stepeni gumusirovannosti (The assessment of grey soils fertility transformation according to the degree of humus content), *Vestnik KrasGAU*, 2018, No. 3(138), pp. 240–246.

51. Sychev V.G., Naliukhin A.N., Shevtsova L.K., Rukhovich O.V., Belichenko M.V., Influence of Fertilizer Systems on Soil Organic Carbon Content and Crop Yield: Results of Long-Term Field Experiments at the Geographical Network of Research Stations in Russia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53(12), pp. 1794–1808, DOI: [10.1134/S1064229320120133](https://doi.org/10.1134/S1064229320120133).

52. Titova V.I., Artem'eva Z.S., Arhangel'skaya A.M., Agrogennaya transformaciya organicheskogo veshchestva svetlo-seroj lesnoj legkosuglinistoj pochvy (po issledovaniyam v dlitel'nom opyte) (Agrogenic transformation of organic matter in light-gray soil with sandy-loam texture (according to the long-term experiment results)), *Izvestiya TSKHA*, 2013, Iss. 3, pp. 18–30.

53. Urusevskaya I.S., Meshalkina Y.L., Khokhlova O.S., Geografo-geneticheskie osobennosti gumusovogo sostoyaniya seryh lesnyh pochv (Geographic and genetic features of the humus status of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 2000, No. 11, pp. 1377–1390.

54. Ushakov R.N., Kachestvennyj sostav gumusa seroj lesnoj pochvy pri vnesenii udobrenij (Humus qualitative composition of gray forest soil during fertilization), *Plodorodie*, 2007, No. 1, pp. 17–18.

55. Khabirov I.K., *Ekologiya i biohimiya azota v pochvah Priural'ya* (Ecology and biochemistry of nitrogen in the soils of the Urals), Ufa: UNC RAN, 1993, 224 p.

56. Khabirov I.K., Gabbasova I.M., Khaziev F.H., *Ustojchivost' pochvennyh processov* (Sustainability of soil processes), Ufa: BGAU, 2001, 327 p.

57. Khodzhaeva A.K., Semenov V.M., Distribution of active organic matter in the soil profiles of natural and agricultural ecosystems, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(12), pp. 1361–1369, DOI: [10.1134/S1064229315120108](https://doi.org/10.1134/S1064229315120108).
58. Chendev Yu.G., Aleksandrovskii A.L., Khokhlova O.S., Smirnova L.G., Novykh L.L., Dolgikh A.V., Anthropogenic evolution of dark gray forest-steppe soils in the southern part of the Central Russian Upland, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44(1), pp. 1–12, DOI: [10.1134/S1064229311010030](https://doi.org/10.1134/S1064229311010030).
59. Chendev Yu.G., *Evoluciya lesostepnyh pochv Srednerusskoj vozvyshechnosti v golocene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008, 212 p.
60. Chimitdorzhieva G.D., *Organicheskoe veshchestvo holodnyh pochv* (Organic matter of the cold soils), Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2016, 388 p.
61. Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Ocenka skorosti izmeneniya gumusnogo sostoyaniya dernovo-podzolistyh i seryh lesnyh pochv v usloviyah zalezhi (Estimation of the change rates in the humus state of soddy-podzolic and gray forest soils under fallow conditions), In: *Upravlenie pochvennym plodorodiem i pitanie kul'turnyh rastenij*, Omsk: LITERA, 2015, pp. 185–190.
62. Yakimenko V.N., Konarbaeva G.A., Transformaciya fonda tyazhelyh metallov seroj lesnoj pochvy v agrocenoze (The Transformation of the Heavy Metals Funds in Grey Forest Soil of Agrocenosis), *Agrohimiya*, 2016, No. 4, pp. 61–69.
63. Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W., Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key, *Nature Communications*, 2023, Vol. 14, Art. No. 2967, DOI: [10.1038/s41467-023-38700-5](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5).
64. Arevalo C.B.M., Chang S.X., Bhatti J.S., Sidders D., Mineralization Potential and Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon under Different Land Uses in the Parkland Region of Alberta, Canada, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2012, Vol. 76(1), pp. 241–251, DOI: [10.2136/sssaj2011.0126](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0126).
65. Begill N., Don A., Poeplau C., No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils, *Global Change Biol.*, 2023, Vol. 29(16), pp. 4662–4669, DOI: [10.1111/gcb.16804](https://doi.org/10.1111/gcb.16804).
66. Benbi D.K., Boparai A.K., Brar K., Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2014, Vol. 70, pp. 183–192, DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.12.032](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.032).
67. Cambardella C.A., Elliott E.T., Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, Vol. 56(3), pp. 777–783, DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).

68. Cotrufo M.F., Haddix M.L., Kroeger M.E., Stewart C.E., The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 168, Art. No. 108648, DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108648](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648).
69. Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E., Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter, *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 989–994, DOI: [10.1038/s41561-019-0484-6](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6).
70. Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E., The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biol.*, 2013, Vol. 19(4), pp. 988–995, DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).
71. Derrien D., Barré P., Basile-Doelsch I., Cécillon L., Chabbi A., Crème A., Fontaine S., Henneron L., Janot N., Lashermes G., Quénéa K., Rees F., Dignac M.F., Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review, *Agronomy Sust. Develop.*, 2023, Vol. 43, Art. No. 21, DOI: [10.1007/s13593-023-00876-x](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00876-x).
72. Dobarco M.R., Wadoux A.M.J.-C., Malone B., Minasny B., McBratney A.B., Searle R., Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty, *Biogeosciences*, 2023, Vol. 20, pp. 1559–1586, DOI: [10.5194/bg-20-1559-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023).
73. Haddix M.L., Gregorich E.G., Helgason B.L., Janzen H., Ellert B.H., Cotrufo M.F., Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil, *Geoderma*, 2020, Vol. 363, Art. No. 114160, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114160](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160).
74. Just C., Armbruster M., Barkusky D., Baumecker M., Diepolder M., Döring T. F., Heigl L., Honermeier B., Jate M., Merbach I., Rusch C., Schubert D., Schulz F., Schweitzer K., Seidel S., Sommer M., Spiegel H., Thumm U., Urbatzka P., Zimmer J., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as derived from particulate and mineral-associated organic matter, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, Art. No. 116472, DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116472).
75. Just C., Poeplau C., Don A., van Wesemael B., Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., A simple approach to isolate slow and fast cycling organic carbon fractions in Central European Soils – importance of dispersion method, *Front. Soil Sci.*, 2021, Vol. 1, Art. No. 692583, DOI: [10.3389/fsoil.2021.692583](https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.692583).

76. Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S., Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management, In: *Understanding and fostering soil carbon sequestration*, Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022, pp. 1–36, DOI: [10.19103/AS.2022.0106.02](https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02).
77. Lavalley J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F., Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century, *Global Change Biol.*, 2020, Vol. 26(1), pp. 261–273, DOI: [10.1111/gcb.14859](https://doi.org/10.1111/gcb.14859).
78. Lehmann J., Kleber M., The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, pp. 60–68, DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
79. Liang C., Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal, *Soil Ecol. Lett.*, 2020, Vol. 2, pp. 241–254, DOI: [10.1007/s42832-020-0052-4](https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4).
80. Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M., Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter, *Global Change Biol.*, 2019, Vol. 25(11), pp. 3578–3590, DOI: [10.1111/gcb.14781](https://doi.org/10.1111/gcb.14781).
81. Lugato E., Lavalley J.M., Haddix M.L., Panagos P., Cotrufo M.F., Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter, *Nature Geoscience*, 2021, Vol. 14, pp. 295–300, DOI: [10.1038/s41561-021-00744-x](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x).
82. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F. et al., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26, DOI: [10.1016/j.soilbio.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025).
83. Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I., Höschen C., Schweizer S.A., Buegger F., Pouteau V., Chenu C., Mueller C.W., Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon, *Nature Communications*, 2021, Vol. 12, Art. No. 4115, DOI: [10.1038/s41467-021-24192-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8).
84. Xiao K.Q., Zhao Y., Liang C., Zhao M., Moore O.W., Otero-Fariña A., Zhu Y.G., Johnson K., Peacock C.L., Introducing the soil mineral carbon pump, *Nature Rev. Earth Environ.*, 2023, DOI: [10.1038/s43017-023-00396-y](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y).
85. Xiao W., Feng S., Liu Z., Su Y., Zhang Y., He X., Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils, *Soil Biol. Biochem.*, 2017, Vol. 107, pp. 85–93, DOI: [10.1016/j.soilbio.2016.12.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.025).
86. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J., Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 172, Art. No. 108756, DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.10875](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.10875).