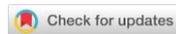


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-91-115



Ссылки для цитирования:

Филимоненко Е.А., Курганова И.Н., Димитрюк Е.А., Лопес де Герену В.О., Упорова М.А., Зорина С.Ю., Соколова Л.Г., Дорофеев Н.В., Самохина Н.П., Личко В.И., Ходжаева А.К., Кузяков Я.В. Дыхательная активность и термическая стабильность органического вещества серых почв в процессе постагрогенного развития // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 124. “Почвенное органическое вещество”. С. 91-115. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-91-115

Cite this article as:

Filimonenko E.A., Kurganova I.N., Dimitryuk E.A., Lopes de Gerenu V.O., Uporova M.A., Zorina S.Y., Sokolova L.G., Dorofeev N.V., Samokhina N.P., Lichko V.I., Khodjaeva A.K., Kuzyakov Y.V., Soil respiration activity and thermal stability of organic matter under the post-agricultural evolution of Naplic Luvisol, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 124, “Soil organic matter”, pp. 91-115, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-91-115

Благодарность:

Авторы признательны Клюке Г.Г. и Волженину И.Е. (ТюмГУ) за помощь в отборе проб почв, а также Мякшиной Т.Н. (ИФХиБПП РАН) за определение содержания органического углерода и общего азота в водных вытяжках из почв. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00370 “Термические свойства почв как индикатор стабильности почвенного органического вещества”, <https://rscf.ru/project/23-24-00370/>).

Acknowledgments:

Авторы признательны Клюке Г.Г. и Волженину И.Е. (ТюмГУ) за помощь в отборе проб почв, а также Мякшиной Т.Н. (ИФХиБПП РАН) за определение содержания органического углерода и общего азота в водных вытяжках из почв. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00370 “Термические свойства почв как индикатор стабильности почвенного органического вещества”, <https://rscf.ru/project/23-24-00370/>).

Дыхательная активность и термическая стабильность органического вещества серых почв в процессе постагрогенного развития

© 2025 г. Е. А. Филимоненко^{1*}, И. Н. Курганова²,
Е. А. Димитрюк¹, В. О. Лопес де Гереню², М. А. Упорова¹,
С. Ю. Зорина³, Л. Г. Соколова³, Н. В. Дорофеев³,
Н. П. Самохина⁴, В. И. Личко², А. К. Ходжаева²,
Я. В. Кузяков⁵

¹Тюменский государственный университет, Россия,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6

* <https://orcid.org/0000-0002-8146-4514>, e-mail: efilimonenko@mail.ru.

²Институт физико-химических и
биологических проблем почвоведения РАН, Россия,
142290, Пушкино, ул. Институтская, 2.

³Сибирский институт физиологии и
биохимии растений СО РАН, Россия,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132.

⁴Научно-технологический университет “Сириус”,
Университет “Сириус”, Россия,
354340, федеральная территория “Сириус”, Олимпийский пр., д. 1.

⁵Гёттингенский университет имени Георга Августа, Германия,
37077, Гёттинген.

Поступила в редакцию 12.04.2024, после доработки 30.05.2024,
принята к публикации 21.07.2025

Резюме: Для оценки изменений дыхательной активности и термической стабильности почвенного органического вещества в процессе ее постагрогенного развития исследовали хроноряд серых почв (Narlic Luvisol), включающий пашню, залежи 7-летнего и 25-летнего возраста и суходольный луг. Образцы почв (0–30 см) на каждом из участков исследования отбирали в трех пространственно удаленных точках. В почвах методом элементного анализа (сухое окисление) определяли содержание органического углерода и общего азота. Используя метод термогравиметрического анализа, количественно оценивали пулы термически лабильного, стабильного и устойчивого почвенного органического вещества. В водных вытяжках определяли содержание растворенных форм углерода и азота. Скорость базального дыхания измеряли по интенсивности выделения CO₂ при инкубировании почв. Содержание углерода микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания. В ходе постагрогенного развития бывших пахотных почв в них увеличивается содержание органического, растворенного и микробного углерода, общего и растворенного азота, и

возрастает скорость базального дыхания. В почвах залежей, по сравнению с пахотной почвой, увеличивается доступность почвенного углерода к микробному разложению. В составе почвенного органического вещества преобладает термически лабильный пул (54–68%). Термически стабильный пул органического вещества почв составляет 19–25%, устойчивый – 13–21% от общего органического вещества. Скорость накопления термически лабильного пула, рассчитанная для 25-летнего периода залежного режима, равна 3.9 мг_{лаб-ПОВ}/Г, стабильного – 0.97 мг_{стаб-ПОВ}/Г и устойчивого – 0.52 мг_{уст-ПОВ}/Г в год в верхних 30 см почвы. При переходе пахотных почв в залежные в составе почвенного органического вещества увеличивается доля термически лабильного пула, приводя к снижению интегральной термической стабильности почвенного органического вещества. Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между доступностью органического вещества к микробной минерализации и его термической стабильностью.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ; термическая стабильность; микробная активность; хроноряд залежных почв; Haplic Luvisol.

Soil respiration activity and thermal stability of organic matter under the post-agricultural evolution of Haplic Luvisol

© 2025 E. A. Filimonenko^{1*}, I. N. Kurganova², E. A. Dimitryuk¹,
V. O. Lopez de Gerenu², M. A. Uporova¹, S. Y. Zorina³,
L. G. Sokolova³, N. V. Dorofeev³, N. P. Samokhina⁴, V. I. Lichko²,
A. K. Khodjaeva², Y. V. Kuzyakov⁵

¹University of Tyumen,

6 Volodarskogo Str., Tyumen 625003, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-8146-4514>, e-mail: efilimonenko@mail.ru.

²Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS,
2/2 Institutskaya str., Pushchino 142290, Russian Federation.

³Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS,
132 Lermontova Str., Irkutsk 664033, Russian Federation.

⁴Sirius University of Science and Technology, Sirius,
1 Olympiyskiy Ave., Sirius Federal Territory 354340, Russian Federation.

⁵*University of Gottingen,
Gottingen 37077, Germany.*

Received 12.04.2024, Revised 30.05.2024, Accepted 21.07.2025

Abstract: The aim of the study was to investigate the effects of post-agricultural soil development on the respiratory activity and thermal stability of accumulated organic matter. A post-agricultural chronosequence formed on Haplic Luvisols and including currently arable land, 7- and 25-year-old post-agricultural abandoned land and grassland was studied. Soils were studied using thermogravimetric analysis aimed to investigate pools of thermally labile, stable and persistent soil organic matter (SOM). Elemental analysis was used to determine organic carbon and total nitrogen in bulk soil and water extracts. Basal and substrate-induced respiration rates were determined by incubating soils and measuring the amount of CO₂ released. The content and pool of soil microbial carbon were calculated based on the measured substrate-induced respiration. Organic, dissolved and microbial carbon, total and dissolved nitrogen and basal respiration rates increased during the post-agricultural development of soils. The specific respiration of microbial biomass was lowest in arable soil and increased after its abandonment. The availability of soil carbon for microbial decomposition increased in abandoned soils compared to arable ones. The SOM was dominated by the thermally labile pool (54–68%). The size of the thermally stable pool of SOM was 19–25%, persistent SOM was 13–21%. The accumulation rate of the thermally labile pool in the upper 30 cm of the soil, calculated for the 25-year period of the abandoned land use, was equal to 3.9 mg lab-SOM per year, stable – 0.97 mg stab-SOM per year and persistent – 0.52 mg pers-SOM per year. As arable land was converted to abandoned, the proportion of the thermally labile pool in SOM increased. The post-agricultural increase in dissolved organic carbon was associated with the rise of the thermally labile pool of SOM, indicating the relationship between the availability of organic matter for microbial decomposition and its thermal stability.

Keywords: thermogravimetric analysis; thermal stability; microbial activity; postagrogenic chronosequence; Haplic Luvisol.

ВВЕДЕНИЕ

Почвы являются ключевым биосферным резервуаром органического углерода (С) и важнейшим элементом глобального углеродного цикла (IPCC, 2023). Существенным фактором, влияющим на глобальный цикл С, является изменение типа землепользования, и в частности переход пахотных почв в залежи, сопро-

вождающийся восстановлением естественной растительности, почв и накоплением в них органического С (Kurganova et al., 2012; Ren et al., 2020; Bell et al., 2023). Интенсивность и скорость накопления С в залежных почвах определяются исходными свойствами почв и степенью их деградированности, а также продолжительностью залежного режима землепользования (Kurganova et al., 2012). Запас органического С в почве регулируется соотношением между его поступлением и биохимическими и физическими потерями (Когут и др., 2021). Минерализация почвенного органического вещества (ПОВ), определяющая биохимические потери С из почвы, зависит от его собственной устойчивости к микробному разложению, активности почвенных микробных сообществ и условий внешней среды.

Для изучения структуры, строения и стабильности ПОВ применяется множество методов его фракционирования, направленных на разделение сложного и гетерогенного по составу ПОВ на более однородные по своим свойствам пулы. Практика современных исследований включает широкое применение методов биологического, денсиметрического, гранулометрического, химического и термического фракционирования ПОВ (Холодов и др., 2023).

Фракционирование пулов ПОВ на основании различий их термических свойств является удобным аналитическим подходом для оценки собственной, т. е. внутренней, стабильности органических веществ. Термическая стабильность ПОВ характеризуется температурой, при которой оно разрушается: чем выше температура сгорания или пиролитического разложения ПОВ, тем оно стабильнее (Plante et al., 2009). Основными факторами, определяющими термическую стабильность органических веществ, являются их молекулярная и структурная сложность и стабилизация через формирование комплексов с почвенными минералами (Barros et al., 2011; Chen et al., 2018; Kučerík et al., 2018). При нагревании почвы в окислительных условиях в диапазоне от комнатной температуры до 600 °С происходит уменьшение массы образца почвы. Убыль массы, происходящая при нагреве образца до 110–150 °С, обусловлена потерей связанной почвенной влаги. Дальнейшее нагревание почвы до 550–600 °С приводит к потерям

массы в результате сгорания органического вещества (Plante et al., 2011). Снижение массы почвы в результате преобразований в минеральной компоненте почв при температурах 180–600 °С также возможно, например, при дегидроксилировании глинистых минералов (Plante et al., 2009), однако интенсивность этих эффектов на порядок меньше по сравнению с эффектами от окисления органического вещества.

Собственная стабильность накапливаемого в почве органического вещества при переходе пахотных почв в залежные земли определяет устойчивость накапливаемого ПОВ к микробной минерализации, а ее количественная оценка важна для понимания потенциала секвестрации С в постагрогенных экосистемах. Цель представленного исследования состоит в оценке изменений дыхательной активности и термической стабильности ПОВ, а также его накопления в процессе постагрогенного развития почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Мы использовали постагрогенный хроноряд для изучения свойств почвы при ее переходе из пашни в залежь. Постагрогенный хроноряд состоял из четырех объектов – пашни, 7-летней и 25-летней залежей и суходольного луга. Объекты исследования расположены на территории полевого стационара СИФИБР СО РАН в Заларинском районе Иркутской области. Климат территории исследования резко континентальный, со среднегодовой температурой минус 0.7 °С и со среднегодовым количеством осадков 270–450 мм. Почва района исследования, согласно классификации почв 2004 г. (Полевой определитель, 2008), классифицирована как серая или *Na_hlic Luvisol* (WRB, 2022). Расположение и общий вид объектов исследования приведены на рисунке 1, а их общая характеристика представлена в таблице 1.

На каждом из четырех объектов исследования закладывали полнопрофильные разрезы для морфологической характеристики почв и определения плотности методом режущего кольца на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см в трех повторностях (Теории и методы физики почв, 2007). На расстоянии не менее 30 м от основного разреза в трех локациях, удаленных друг от друга на 30–50 м, закладывали по 3 прикопки глубиной 40–50 см, в которых на тех

же глубинах, где проводили определение плотности, отбирали смешанные образцы. В лаборатории почвы были высушены до воздушно-сухого состояния при температуре 20 °С и просеяны через сито с размером ячеек 2 мм.



Рис. 1. Общий вид объектов исследования и фотографии почвенных профилей.

Fig. 1. Study sites and soil profiles photos.

В почвенных образцах определяли величину рН (потенциометрически на рН-метре Mettler Toledo, Швейцария, при соотношении почва : вода = 1 : 5; 3-кратная повторность) и гранулометрический состав методом пипетки (Теории и методы физики почв, 2007). Определение содержания органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота ($N_{общ}$) выполняли методом сухого каталитического сжигания в токе кислорода на элементном анализаторе Vario Puro Cube (Elementar, Германия). Содержание водорастворимых форм углерода ($C_{раств}$) и азота ($N_{раств}$) измеряли в водных вытяжках (соотношение почва : вода = 1 : 5) на элементном анализаторе Топаз (Россия).

Термогравиметрический анализ почв выполняли на приборе TGA/DSC 3+ (Mettler Toledo, Швейцария) при нагревании образцов от 30 до 600 °С со скоростью 5 °С в минуту в окислительной атмосфере при скорости потока воздуха 200 мл/мин.

Таблица 1. Характеристика растительности и почв постагрогенного хроноряда
Table 1. Vegetation and soil characteristic for sites of post-agricultural chronosequence

Растительная ассоциация	Название почвы	Содержание физ. глины, %	Текстура почв	Песок : пыль : ил	pH (H ₂ O)	Плотность, г/см ³
Пашня (53°33.54,21 N, 102°35.22,34 E)						
Почва под паром	Агросерая среднесуглинистая (Haplic Luvisol (Siltic, Aric))	44.8	суглинок тяжелый	27 : 50 : 23	7.2 ± 0.1	1.43
7-летняя залежь (53°34.03,70 N, 102°35.18,24 E)						
Кипрейно-бодяково-луговоовсяничево-кострецово-разнотравная ассоциация	Агросерая постагрогенная среднесуглинистая (Haplic Luvisol (Siltic, Aric, Humic))	44.8	суглинок тяжелый	30 : 49 : 21	7.2 ± 0.1	1.37
25-летняя залежь (53°34.03,70 N, 102°35.18,24 E)						
Овсяничево-горошково-васильково-кипрейно-разнотравная ассоциация	Агросерая постагрогенная среднесуглинистая (Haplic Luvisol (Siltic, Aric, Humic))	49.8	суглинок тяжелый	16 : 62 : 22	7.3 ± 0.1	1.16
Суходольный луг (53°34.04,09 N, 102°35.16,22 E)						
Кострецово-пырейно-разнотравная ассоциация	Серая среднесуглинистая (Haplic Luvisol (Siltic))	40.0	суглинок тяжелый	30 : 54 : 16	7.2 ± 0.1	1.31

Обработка данных термического анализа почв включала расчеты: **а)** дифференциальных потерь масс, происходящих на каждые 10 °С нагрева почв (Tokarski et al., 2020); **б)** размеров пулов почвенного органического вещества (ПОВ) с различной термической стабильностью (Филимоненко и др., 2023); **в)** температуры окисления половины содержащегося в образце ПОВ (T_{50}) (Холодов и др., 2023; Kurganova et al., 2019). Скорость накопления ПОВ с различной термической стабильностью оценивали по разнице их содержания в залежных и пахотных почвах, разделенной на количество лет после прекращения распашки.

Скорость базального дыхания (БД) определяли по интенсивности выделения CO_2 из почвы при ее инкубировании (20 °С) в условиях ее увлажнения до 70% от полной влагоемкости (Курганова и др., 2021). Для измерения концентрации CO_2 в инкубационных флаконах использовали ИК-газоанализатор LI-830 (LI-Cor, США). Для определения углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) использовали метод субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 1978).

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили в ПО STATISTICA 10 и MS Excel 2016. Для всех экспериментальных данных были рассчитаны средние арифметические значения, стандартное отклонение и ошибка среднего. На всех рисунках в качестве меры достоверности оценки средних значений представлена стандартная ошибка. Оценка значимости изменений почвенных свойств в зависимости от типа землепользования выполнена с помощью однофакторного дисперсионного анализа при уровне значимости $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода и азота в постагрогенных почвах

При переходе пахотных почв в залежные снижается их плотность сложения: с 1.43 г/см³ в почвах пашни (0–30 см) до 1.36 г/см³ в почвах 7-летней залежи и до 1.14 г/см³ в почвах 25-летней залежи. Средняя плотность сложения почвы на глубине 0–30 см на участке суходольного луга равна 1.24 г/см³.

В почве пашни содержание $C_{\text{орг}}$ в 1.5–3.0 раза ниже, чем в почве под естественным лугом, где в верхних 10 см содержится

54 ± 6 г/кг органического углерода (рис. 2). При переходе пашни в залежь содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах увеличивается. Если содержание $C_{\text{орг}}$ в почве пашни принять за “нулевую точку”, то за первые 7 лет залежного режима почв ежегодное увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ в них составляет 0.11%, а среднее за период 25 лет – 0.07%. Увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ в почвах при их постагрогенном развитии наиболее интенсивно выражено в верхних 10 см, где содержание $C_{\text{орг}}$ через 7 лет после прекращения распашки увеличилось в 1.6 раза, а через 25 лет – в 2.3 раза относительно пахотной почвы. Содержание $C_{\text{орг}}$ в почве на глубине от 10 до 30 см возросло в 1.3 и 1.8 раза через 7 и 25 лет залежного режима соответственно по сравнению с пахотными почвами (рис. 2).

Содержание $N_{\text{общ}}$ в верхних 30 см почв пашни в 2.1 раза ниже, чем в почве суходольного луга. Через 25 лет залежного режима содержание $N_{\text{общ}}$ достигло значений, близких к аналогичным в почве суходольного луга (рис. 2). Отношение $C : N$ в пахотных и залежных почвах в среднем равно 14.2 ± 0.3 и близко к почве под естественным лугом – 13.9 ± 0.3 .

Содержание растворенного органического углерода в верхних 20 см пахотной почвы в 2.2 раза ниже относительно почвы, сформированной под лугом (рис. 3). Через 7 лет после прекращения распашки содержание $C_{\text{раств}}$ увеличивается в верхних 10 см почвы. В ходе дальнейшего постагрогенного развития содержание $C_{\text{раств}}$ увеличивается и в более глубоких слоях почвы (до 20 см) и соответствует величине в естественной почве под лугом.

Содержание $N_{\text{раств}}$ в пахотной почве с глубиной практически не изменяется, составляя в среднем 4.9 мг/дм^3 . Спустя 7 лет после прекращения распашки содержание $N_{\text{раств}}$ на разных глубинах в пределах верхних 30 см почвы снижается в 1.2–2.6 раза (рис. 3). Почвы под лугом характеризуются самым высоким содержанием $N_{\text{раств}}$ среди всех объектов хроноряда. Почвы 25-летней залежи в верхних 10 см содержат $N_{\text{раств}}$ в 2.4 раза меньше по сравнению с почвой суходольного луга.

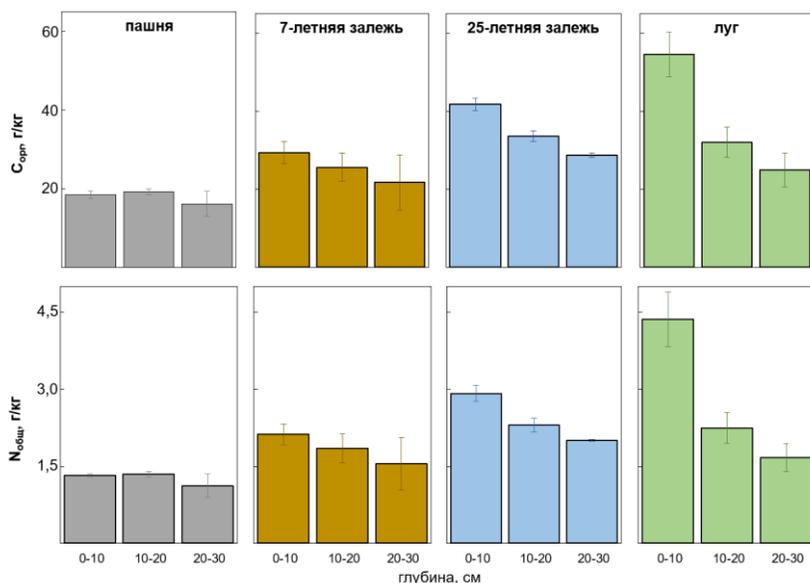


Рис. 2. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота ($N_{общ}$) в почвах пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного суходольного луга на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Fig. 2. Content of soil organic carbon and total nitrogen in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow at depths of 0–10, 10–20 and 20–30 cm.

Биомасса и дыхание почвенных микроорганизмов в постагрогенных почвах

Скорость базального дыхания пахотных почв (0–30 см) составляет 3.4 мкгС/г·сут и является наименьшей среди всех рассматриваемых объектов хроноряда (рис. 4). Через 7 лет залежного режима землепользования скорость БД на глубине 0–10 см увеличивается в 7.2 раза, а на глубине 10–30 см – в 1.4 раза. Сохранение залежного режима землепользования в течение 25 лет приводит к увеличению БД в 3.6 раза на глубине 10–30 см относительно почв пашни, при этом в верхних 10 см почвы увеличение скорости БД относительно почв 7-летней залежи не наблюдается.

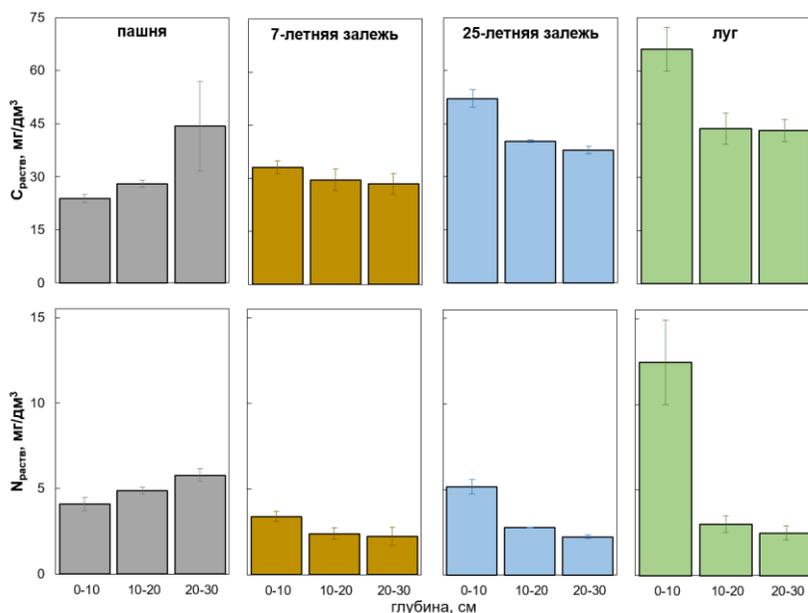


Рис. 3. Содержание растворенного органического углерода ($C_{\text{раств}}$) и растворенного общего азота ($N_{\text{раств}}$) в почвах пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного суходольного луга на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Fig. 3. Content of dissolved organic carbon and dissolved total nitrogen in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow at depths of 0–10, 10–20 and 20–30 cm.

Доля микробного углерода составляет 0.9% и 1.0% в составе $C_{\text{орг}}$ в почвах пашни и под лугом соответственно (рис. 4). В верхних 10 см залежных почв $C_{\text{мик}}$ составляет 1.8–3.1% от $C_{\text{орг}}$. В почвах 7-летней залежи на глубине 10–30 см пул микробного углерода сопоставим с пахотными почвами (0.9% от $C_{\text{орг}}$), а в почвах 25-летней залежи превышает аналогичный параметр для почв пашни в 1.5 раза (1.4% от $C_{\text{орг}}$).

Удельное дыхание микробной биомассы, рассчитанное как отношение БД к содержанию в почве $C_{\text{мик}}$ и являющееся показателем экофизиологического состояния микробного сообщества почвы, имеет наименьшее значение в пахотной почве (в среднем $0.23 \text{ мг} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{C} / (\text{г} \cdot C_{\text{мик}} \cdot \text{сут})$) и увеличивается в процессе постагро-

генного развития до $0.31 \text{ мг} \cdot \text{CO}_2\text{-C}/(\text{г} \cdot \text{C}_{\text{мик}} \cdot \text{сут})$ в почве 25-летней залежи. Отношение скорости БД к содержанию в почве $\text{C}_{\text{орг}}$, являющееся индикатором доступности почвенного органического углерода для микробного разложения, увеличивается в 2.2–2.4 раза в залежных почвах по сравнению с почвами пашни, где оно составляет $0.19 \text{ мг} \cdot \text{C}/(\text{г} \cdot \text{C}_{\text{орг}} \cdot \text{сут})$.

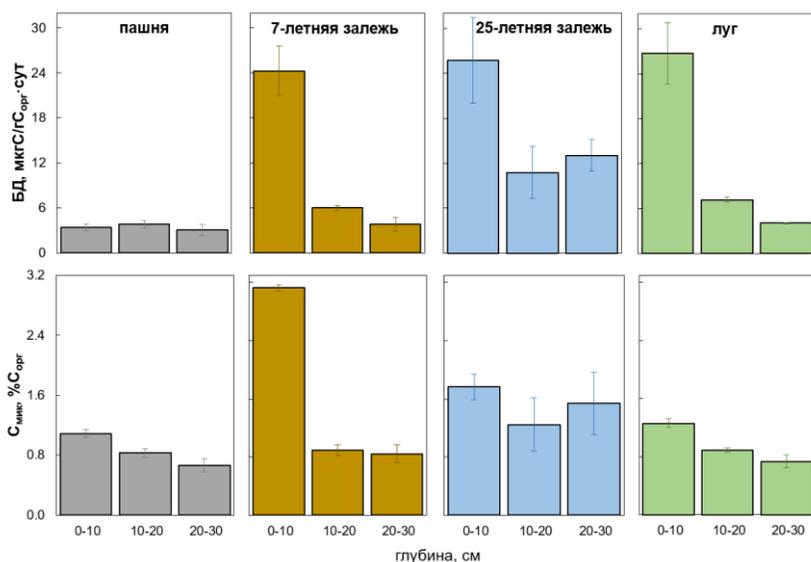


Рис. 4. Скорость базального дыхания (БД) и пул углерода микробной биомассы ($\text{C}_{\text{мик}}$) в почвах пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного суходольного луга на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Fig. 4. Basal respiration rate and microbial biomass carbon in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow at depths of 0–10, 10–20 and 20–30 cm.

Термическая стабильность органического вещества постагрогенных почв

Потери массы почвы при ее нагревании от $180 \text{ }^\circ\text{C}$ до $550 \text{ }^\circ\text{C}$ являются результатом последовательного окисления пулов ПОВ с увеличивающейся термической стабильностью (рис. 5). В составе ПОВ был выделен пул термически лабильного органического ве-

щества (термические потери при нагревании почвы от 180 до 380 °С); термически стабильный пул (380 до 450 °С) и термически устойчивый пул (450 до 550 °С). Ступенчатое окисление пулов ПОВ при равномерном нагревании почвы приводит к частичному перекрытию пиков, соответствующих термически лабильному, стабильному и устойчивому пулам, на термогравиметрических кривых (рис. 5).

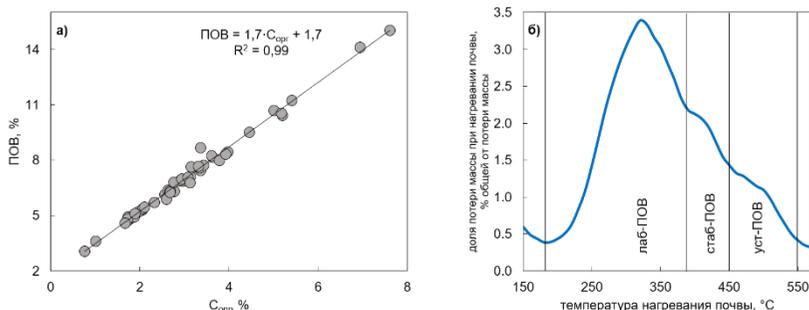


Рис. 5. а) Зависимость между содержанием в почве органического углерода, определенного методом элементного анализа ($C_{\text{орг}}$), и содержанием органического вещества, определенного термогравиметрическим методом. **б)** Фрагмент типичной кривой термогравиметрического анализа почвы с выделенными температурными интервалами для оценки пулов термически лабильного (лаб-ПОВ), стабильного (стаб-ПОВ) и устойчивого (уст-ПОВ) почвенного органического вещества.

Fig. 5. а) Regression between soil organic carbon content determined by elemental analysis and soil organic matter content determined by thermogravimetric analysis. **б)** Part of a typical curve of soil thermogravimetric analysis with temperature intervals for estimation of pools of thermally labile, stable and persistent soil organic matter.

В составе ПОВ преобладает термически лабильный пул (54–68%). Размер стабильного пула составляет 19–25% ПОВ, устойчивого – 13–21% (рис. 6). Отношение содержания лабильного ПОВ к сумме стабильного и устойчивого органического вещества в пахотных почвах равно 1.2. При постагрогенном развитии почвы отношение лаб-ПОВ к сумме стаб-ПОВ и уст-ПОВ увели-

чивается до 1.4 и 1.6 в почвах 7-летней и 25-летней залежей соответственно за счет того, что накопление термически лабильного ПОВ происходит быстрее по сравнению с более стабильными пулами (рис. 6). Скорость накопления термически лабильного пула ПОВ, рассчитанная для 25-летнего периода залежного режима, равна 3.9 мг_{лаб-ПОВ}/г, стабильного – 0.97 мг_{стаб-ПОВ}/г и устойчивого – 0.52 мг_{уст-ПОВ}/г в год.

Температура потери 50% органического вещества (T_{50}) пахотных почв равна 367 °С (рис. 7). В процессе постагрогенного развития почв T_{50} снижается и составляет 359 °С и 351 °С в почвах 7-летней и 25-летней залежей соответственно за счет накопления термически лабильного ПОВ, прирост которого происходит в 4.2 раза быстрее стабильного и в 7.5 раз быстрее устойчивого пула.

Стратификация почвенных характеристик при постагрогенном восстановлении почв

Коэффициенты стратификации (КС), отражающие степень неоднородности почвенного профиля, были рассчитаны для всех рассматриваемых почвенных характеристик как отношения их величин на глубине 0–10 см к величинам на глубине 20–30 см (рис. 8). Почвы пашни характеризуются значениями КС в узком диапазоне от 0.5 ($C_{раств}$) до 1.6 ($C_{мик}$), что свидетельствует об их высокой однородности в пределах верхних 30 см. Почвы под луговым ценозом характеризуются наибольшими значениями КС почвенных характеристик (рис. 8). Прекращение возделывания сельскохозяйственных культур и оставление почв под залежь приводит к увеличению КС всех почвенных характеристик. Наибольший рост КС установлен для скорости базального дыхания, удельного дыхания на единицу $C_{орг}$, содержания микробного углерода, общего и растворенного азота. Наиболее устойчивыми почвенными характеристиками постагрогенных процессов являются $C : N$, рН и T_{50} .

Улучшение физических и структурных свойств почв при их постагрогенном развитии (Баева и др., 2017) обеспечивается в значительной степени развитием корневых систем при естественном восстановлении растительности на залежных участках (рис. 1).

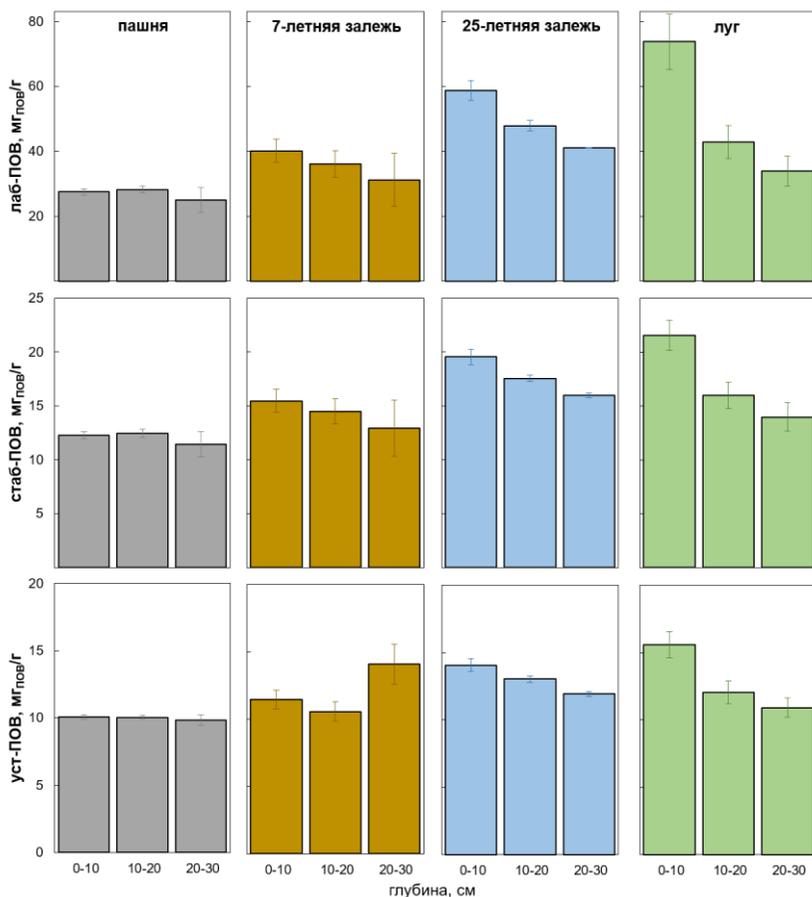


Рис. 6. Содержание термически лабильного, стабильного и устойчивого органического вещества в почвах пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного луга на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Fig. 6. Content of thermally labile, stable and persistent organic matter in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow at depths of 0–10, 10–20 and 20–30 cm.

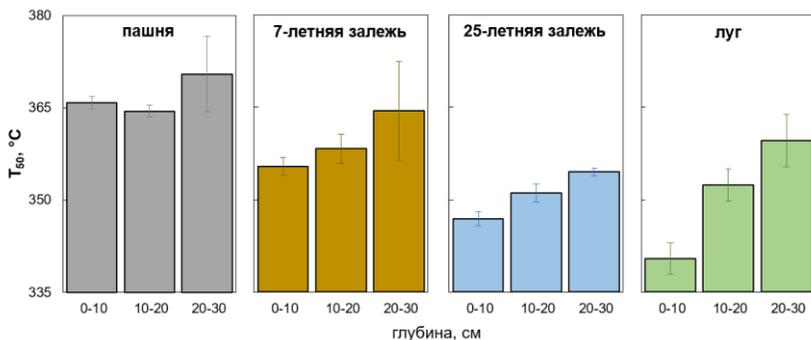


Рис. 7. Температура термического окисления 50% органического вещества почв (T_{50}) пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного суходольного луга на глубинах 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Fig. 7. Thermal oxidation temperature of 50% of soil organic matter (T_{50}) in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow at depths of 0–10, 10–20 and 20–30 cm.

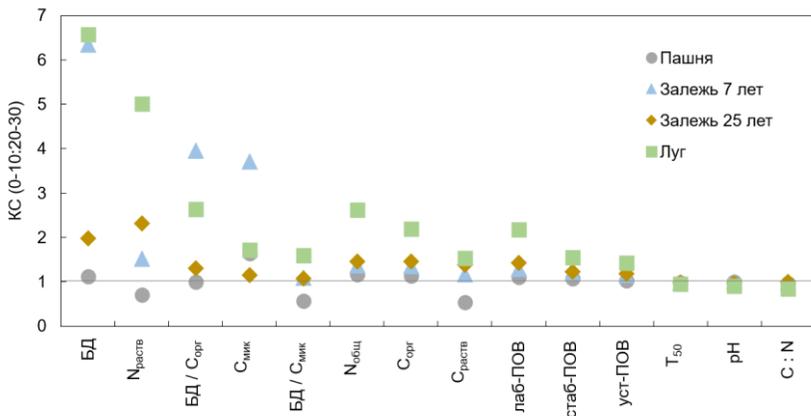


Рис. 8. Коэффициенты стратификации почвенных характеристик между их величинами на глубине 0–10 и 20–30 см пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного луга.

Fig. 8. Stratification coefficients of soil characteristics between their values at 0–10 and 20–30 cm depth of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow.

Прекращение распашки останавливает разрушение корневых систем и гифов, чувствительных к механическим нарушениям при сельскохозяйственной обработке пахотных почв. Активизация развития гифов в залежных почвах, по сравнению с пахотными, увеличивает поступление в почву глюकोпротеинов. Это повышает содержание в постагрогенных почвах азота и способствует агрегированию почвы, увеличивая ее порозность и уменьшая плотность сложения (табл. 1). Сукцессия растительности на залежных землях увеличивает количество и разнообразие поступающих в почву органических веществ с корневыми выделениями, корневым и наземным опадом по сравнению с пашней (Pausc, Kuzyakov, 2018). При переводе пахотных почв в залежные в них возрастает содержание органического вещества (рис. 2, 3, 6).

Качественное разнообразие поступающего в почву органического вещества при ее постагрогенном развитии проявляется в единовременном накоплении ПОВ в составе термически лабильного, стабильного и устойчивого пулов (рис. 6), которое происходит в соотношении 7.5 : 1.8 : 1. Такое различие в скоростях постагрогенного накопления ПОВ с различной термической стабильностью приводит к изменению пропорций между пулами ПОВ в залежных почвах по сравнению с пахотными, снижая интегральную термическую стабильность ПОВ (рис. 7). С уменьшением термической стабильности ПОВ в результате конверсии пахотных почв в залежные (рис. 7) дыхательная активность почв возрастает (рис. 4, 9).

Несмотря на то, что в ряде исследований отмечается отсутствие взаимосвязи между термической стабильностью ПОВ и пулом потенциально-минерализуемого органического вещества (Sokolov et al., 2021), мы установили, что увеличение дыхательной активности почв сопряжено с возрастанием содержания растворенного органического углерода (рис. 10), который является наиболее доступным пулом почвенного $C_{\text{орг}}$ для микробной минерализации (Семенов и др., 2023). Растворенный органический углерод ассоциирован преимущественно с термически лабильным ПОВ (рис. 10). И, хотя показатели дыхательной активности отражают большую чувствительность к процессам постагрогенного восстановления почв, чем термические пулы ПОВ (рис. 8), тем не

менее термическая стабильность ПОВ и его устойчивость/доступность к микробной минерализации взаимосвязаны (Doležalová-Weissmannová et al., 2023; Fernández et al., 2011; Plante et al., 2011).

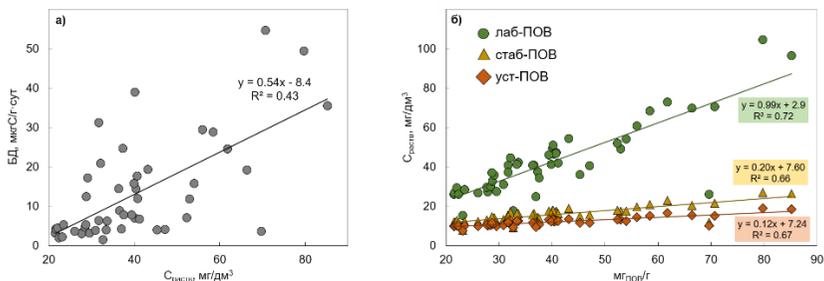


Рис. 10. а) Зависимость скорости базального дыхания (БД) почв пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного луга (0–30 см) от содержания растворенного органического углерода ($C_{\text{раств}}$) в водных вытяжках из них. **б)** Зависимость между содержанием термически лабильного, стабильного и устойчивого ПОВ и содержанием $C_{\text{раств}}$ в водных вытяжках из почв (0–30 см) пашни, залежей 7 и 25 лет и естественного луга.

Fig. 10. а) Regression between basal respiration rates and content of dissolved organic carbon in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow. **б)** Regression between content of thermally labile, stable and persistent SOM and content of dissolved organic carbon of arable land, fallow lands of 7 and 25 years and natural meadow in soils of cropland, abandoned lands of 7 and 25 years and natural dry meadow.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При постагрогенном развитии почв накопление в них термически лабильного, стабильного и устойчивого органического вещества происходит в соотношении 7.5 : 1.8 : 1, что увеличивает в ПОВ залежей долю термически лабильного пула, по сравнению с почвой пашни, и приводит к снижению интегральной термической стабильности ПОВ. Содержание термически лабильного ПОВ возрастает по мере повышения содержания растворенного органического углерода и увеличивает дыхательную активность почв. Показатели дыхательной активности почв, отражающие

устойчивость ПОВ к микробной минерализации, коллинеарны критериям термической стабильности ПОВ, но являются более чувствительными к процессам постагрогенного развития почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029>.
2. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>.
3. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Караванова Е.И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030102>.
4. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
5. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 1. e199. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>.
6. Теории и методы физики почв / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. Тула: Гриф и К, 2007, 616 с.
7. Филимоненко Е.А., Упорова М.А., Арбузова Е.А., Ибраева К., Константинов А.О., Курганова И.Н., Кузяков Я.В. Конверсия пашни в залежь увеличивает стабильность органического вещества почвы // Агрофизика. 2023. № 3. С. 9–16. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2023.03.02>.
8. Холодов В.А., Рогова О.Б., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Волков Д.С., Зиганшина А.Р., Ярославцева Н.В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 52–100. DOI: <https://doi.org/10.19047/01361694-2023-117-52-100>.
9. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry.

1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
10. *Barros N., Salgado J., Villanueva M., Rodriquez-Añón J., Proupin J., Feijóo S., Martín-Pastor M.* Application of DSC–TG and NMR to study the soil organic matter // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011. Vol. 104. No. 1. P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1163-4>.
11. *Bell S.M., Raymond S.J., Yin H., Jiao W., Goll D.S., Ciais P., Olivetti E., Leshyk V.O., Terrer C.* Quantifying the recarbonization of post-agricultural landscapes // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 2139. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37907-w>.
12. *Chen W.-H., Chu Y.-S., Liu J.-L., Chang J.-S.* Thermal degradation of carbohydrates, proteins and lipids in microalgae analyzed by evolutionary computation // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 160. P. 209–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.036>.
13. *Doležalová-Weissmannová H., Malý S., Brtnický M., Holátko J., Demyan M.S., Siewert C., Tokarski D., Kameníková E., Kučerík J.* Practical applications of thermogravimetry in soil science: Part 5. Linking the microbial soil characteristics of grassland and arable soils to thermogravimetry data // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. No. 4. P. 1599–1611. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11709-6>.
14. *Fernández J.M., Plante A.F., Leifeld J., Rasmussen C.* Methodological considerations for using thermal analysis in the characterization of soil organic matter // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011. Vol. 104. No. 1. P. 389–398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1145-6>.
15. IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, P. 35–115. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
16. *Kučerík J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C.* Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen // *Geoderma*. 2018. Vol. 316. P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.001>.
17. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. No. 3. P. 938–947. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.
18. *Kurganova I., Merino A., Lopes de Gerenyu V., Barros N., Kalinina O., Giani L., Kuzyakov Y.* Mechanisms of carbon sequestration and stabilization by restoration of arable soils after abandonment: A chronosequence study on Phaeozems and Chernozems // *Geoderma*. 2019. Vol. 354. P. 113882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113882>.

19. *Pausch J., Kuzyakov Y.* Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale // *Global Change Biology*. 2018. Vol. 24. No. 1. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>.
20. *Plante A.F., Fernández J.M., Haddix M.L., Steinweg J.M., Conant R.T.* Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. Vol. 43. No. 5. P. 1051–1058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.024>.
21. *Plante A.F., Fernández J.M., Leifeld J.* A pplication of thermal analysis techniques in soil science // *Geoderma*. 2009. Vol. 153. No. 1-2. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.016>.
22. *Ren W., Banger K., Tao B., Yang J., Huang Y., Tian H.* Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901–2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management // *Geography and Sustainability*. 2020. Vol. 1. No 1. P. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.001>.
23. *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. P. 487–498. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321040141>.
24. *Tokarski D., Wiesmeier M., Doležalová Weissmannová H., Kalbitz K., Scott Demyan M., Kučerík J., Siewert C.* Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions // *Geoderma*. 2020. Vol. 362. P. 114124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114124>.
25. WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

REFERENCES

1. Baeva Yu.I., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kuderyarov V.N., Fizicheskie svoistva i izmenenie zapasov ugleroda serykh lesnykh pochv v khode postagrogennoi evolyutsii (yug Moskovskoi oblasti) (Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution), *Pochvovedenie*, 2017, No. 3, pp. 345–353, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029>.
2. Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Degumirovanie i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda (Humus depletion and soil carbon sequestration), *Agrokhimiya*, 2021, No. 5, pp. 3–13, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>.

3. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I., Dinamika pulov ugleroda i biologicheskoi aktivnosti agroderново-podzolov yuzhnoi taigi v khode postagrogennoi evolyutsii (Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution), *Pochvovedenie*, 2021, No. 3, pp. 287–303, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030102>.
4. Polevoi opredelitel' pochv Rossii. M.: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, p. 182.
5. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N., Puly i fraktsii organicheskogo ugleroda v pochve: struktura, funktsii i metody opredeleniya, (Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination), *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2023, Vol. 6, No. 1., p. e199. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>.
6. Sheina E.V., Karpachevskiy L.O. (Eds.), *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Tula: Grif i K, 2007, 616 p.
7. Filimonenko E.A., Uporova M.A., Arbuzova E.A., Ibraeva K., Konstantinov A.O., Kurganova I.N., Kuzyakov Ya.V., Konversiya pashni v zalezh' uvelichivaet stabil'nost' organicheskogo veshchestva pochvy (Conversion of arable land into abandoned increase stability of Soil organic matter), *Agrofizika*, 2023, No. 3, pp. 9–16, DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2023.03.02>.
8. Kholodov V.A., Rogova O.B., Lebedeva M.P., Varlamov E.B., Volkov D.S., Ziganshina A.R., Yaroslavtseva N.V., Organic matter and mineral matrix of soils: modern approaches, definitions of terms and methods of study (review), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 52–100, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.
9. Anderson J.P.E., Domsch K.H., A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, pp. 215–221, DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
10. Barros N., Salgado J., Villanueva M., Rodriguez-Añón J., Proupin J., Feijóo S., Martín-Pastor M., Application of DSC–TG and NMR to study the soil organic matter, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, Vol. 104, No. 1, pp. 53–60, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1163-4>.
11. Bell S.M., Raymond S.J., Yin H., Jiao W., Goll D.S., Ciais P., Olivetti E., Leshyk V.O., Terrer C., Quantifying the recarbonization of post-agricultural landscapes, *Nature Communications*, 2023, Vol. 14, No. 1, p. 2139, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37907-w>.
12. Chen W.-H., Chu Y.-S., Liu J.-L., Chang J.-S., Thermal degradation of carbohydrates, proteins and lipids in microalgae analyzed by evolutionary

- computation, *Energy Conversion and Management*, 2018, Vol. 160, pp. 209–219, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.036>.
13. Doležalová-Weissmannová H., Malý S., Brtnický M., Holátko J., Demyan M.S., Siewert C., Tokarski D., Kameníková E., Kučerik J., Practical applications of thermogravimetry in soil science: Part 5. Linking the microbial soil characteristics of grassland and arable soils to thermogravimetry data, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, Vol. 148, No. 4, pp. 1599–1611, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11709-6>.
14. Fernández J.M., Plante A.F., Leifeld J., Rasmussen C., Methodological considerations for using thermal analysis in the characterization of soil organic matter, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, Vol. 104, No. 1, pp. 389–398, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1145-6>.
15. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
16. Kučerik J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C., Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen, *Geoderma*, 2018, Vol. 316, pp. 38–46, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.001>.
17. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y., Carbon cost of collective farming collapse in Russia, *Global Change Biology*, 2014, Vol. 20, No. 3, pp. 938–947, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.
18. Kurganova I., Merino A., Lopes de Gerenyu V., Barros N., Kalinina O., Giani L., Kuzyakov Y., Mechanisms of carbon sequestration and stabilization by restoration of arable soils after abandonment: A chronosequence study on Phaeozems and Chernozems, *Geoderma*, 2019, Vol. 354, p. 113882, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113882>.
19. Pausch J., Kuzyakov Y., Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale, *Global Change Biology*, 2018, Vol. 24, No. 1, pp. 1–12, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>.
20. Plante A.F., Fernández J.M., Haddix M.L., Steinweg J.M., Conant R.T., Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, Vol. 43, No. 5, pp. 1051–1058, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.024>.
21. Plante A.F., Fernández J.M., Leifeld J., Application of thermal analysis techniques in soil science, *Geoderma*, 2009, Vol. 153, No. 1–2, pp. 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.016>.
22. Ren W., Banger K., Tao B., Yang J., Huang Y., Tian H., Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901–2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management, *Geography and*

Sustainability, 2020, Vol. 1, No.1, pp. 59–69, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.001>.

23. 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, pp. 487–498, DOI:
<https://doi.org/10.1134/S1064229321040141>.

24. Tokarski D., Wiesmeier M., Doležalová Weissmannová H., Kalbitz K., Scott Demyan M., Kučerík J., Siewert C., Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions, *Geoderma*, 2020, Vol. 362, p. 114124, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114124>.

25. WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.