

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-244-273



Ссылки для цитирования:

Фарходов Ю.Р., Данилин И.В., Белобров В.П., Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Надуткин И.А., Стройкова М.Н., Хаматнуров Ш.А., Лазарев В.И., Холодов В.А. Химическое строение органического вещества черноземов типичных при различных технологиях земледелия // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 244-273. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-244-273

Cite this article as:

Farkhodov Yu.R., Danilin I.V., Belobrov V.P., Ermolaev N.R., Yudin S.A., Stoikova M.N., Hamatnurov Sh. A., Ilyin B.S., Lazarev V.I., Kholodov V.A., The chemical structure of the organic matter of typical chernozems of various farming technologies, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 244-273, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-244-273

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект No 24-26-00293, <https://www.rscf.ru/project/24-26-00293>.

Acknowledgments:

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-26-00293, <https://www.rscf.ru/project/24-26-00293>.

Химическое строение органического вещества черноземов типичных при различных технологиях земледелия

© 2025 г. Ю. Р. Фарходов^{1*}, И. В. Данилин¹, В. П. Белобров¹,
Н. Р. Ермолаев¹, С. А. Юдин¹, И. А. Надуткин¹,
Ш. А. Хаматнуров¹, М. Н. Стройкова¹, В. И. Лазарев^{2**},
В. А. Холодов¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-0210-380X>,
e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

²Курский Федеральный аграрный научный центр, Россия,
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70Б,

**<https://orcid.org/0000-0002-2931-8560>, e-mail: vla190353@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 17.06.2024, после доработки 17.07.2025,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Экологизация современного земледелия предполагает отказ от технологии традиционной обработки (ТО) и замену ее почвосберегающей. Одной из таких технологий является прямой посев (ПП). Его внедрение существенно изменяет условия поступления и трансформации растительных остатков. При этом мало известно об изменении строения почвенного органического вещества (ПОВ) в условиях применения ПП. Целью работы была сравнительная оценка влияния ПП и ТО на химическое строение органического вещества типичных черноземов. На примере 8-летнего полевого опыта на черноземе типичном (Курская область) проведена оценка влияния технологий ТО и ПП в слоях 0–10 и 10–20 см на химические свойства: pH, содержание подвижных форм фосфора и калия, общего азота, органического углерода, а также химическое строение ПОВ черноземов типичных, для изучения которого применяли методы ИК-спектроскопии и аналитического пиролиза. Строение ПОВ продемонстрировало наиболее выраженную зависимость от технологии земледелия по сравнению с другими изученными свойствами. Трансформация ПОВ в условиях ПП вызвана накоплением углеводов, а также продуктов их микробной переработки. Применение ТО приводит к доминированию в структуре ПОВ компонентов пассивного пула, не участвующих в процессах микробной трансформации. По результатам корреляционного анализа показано, что тенденция к накоплению органического углерода при ПП связана с увеличением доли углеводов и фенольных соединений в составе ПОВ.

Ключевые слова: прямой посев; почвенное органическое вещество; ИК-спектроскопия; аналитический пиролиз; метод главных компонент.

The chemical structure of the organic matter of typical chernozems of various farming technologies

© 2025 Yu. R. Farkhodov^{1*}, I. V. Danilin¹, V. P. Belobrov¹,
N. R. Ermolaev¹, S. A. Yudin¹, I. A. Nadutkin¹,
Sh. A. Hamatnurov¹, M. N. Stroykova¹, V. I. Lazarev^{2**},
V. A. Kholodov¹

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0002-0210-380X>,
e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru.

²Federal Agricultural Kursk Research Center, Russia,
70B Karl Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0002-2931-8560>, e-mail: vla190353@yandex.ru.

Received 17.06.2024, Revised 17.07.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The transition to sustainable agriculture involves the adoption of soil-saving technologies, such as no-till (NT), as an alternative to conventional tillage (CT). The introduction of NT fundamentally alters the dynamics of plant residue input and decomposition; however, its effects on the molecular composition of soil organic matter (SOM) remain insufficiently studied. This study aimed to conduct a comparative assessment of the influence of NT and CT on the chemical structure of SOM in typical chernozems. Soil samples were collected from 0–10 cm and 10–20 cm depths in the 8-year field experiment with a four-course grain crop rotation under NT and CT management. Standard soil chemical properties (pH, available phosphorus and potassium, total nitrogen, and organic carbon) were analyzed. The chemical structure of SOM was characterized using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and analytical pyrolysis. The molecular structure of SOM demonstrated the most pronounced dependence on the tillage practice compared to all other measured properties. The transformation under NT was characterized by the accumulation of carbohydrates and products of their microbial metabolism. In contrast, CT led to the dominance of recalcitrant compounds within the passive pool, which are not involved in active microbial transformation. Correlation analysis revealed that the trends of accumulation of organic carbon under NT is associated with the increased contribution of carbohydrates and phenolic compounds to the SOM composition.

Keywords: no-till; soil organic matter; IR spectrometry; analytical pyrolysis; principal component analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Земледелие России основано на интенсивном и высокоэффективном использовании преимущественно черноземов, которые характеризуются высоким содержанием органического вещества, накопленным за время формирования почв в голоцене, в условиях степного и лесостепного климатического режима. На черноземах России преимущественно используется традиционная технология обработки почв, имеющая региональное почвенно-климатическое разнообразие в применении системы обработки. В мировую прак-

тику земледелия в середине XX в. была внедрена новая технология – прямой посев (ПП), известная за рубежом как no-till, не предусматривающая механическую обработку почвы, при которой все растительные остатки после сбора урожая остаются на ее поверхности, что позволяет снижать водную эрозию и дефляцию, увеличивать запасы почвенного органического вещества (ПОВ) (Дридригер и др., 2020; Иванов, 2021).

Применение различных агротехнологий приводит к изменениям содержания пулов ОВ черноземов, среди которых существенное влияние оказывают технологии обработки почвы (Иванов и др., 2019; Иванов и др., 2021; Холодов, Ярославцева, 2021). Технология обработки почвы регулирует процесс разложения растительных остатков, поступающих в почву, влияя на трансформацию ПОВ в целом. Применение прямого посева усиливает процессы накопления ПОВ, а традиционная обработка (ТО) приводит к его интенсивной минерализации (Дридригер и др., 2020; Kan et al., 2022). Влияние обработки почвы может отражаться не только на содержании ПОВ, но и на его строении. Показано что в условиях применения ПП, по сравнению с традиционной технологией земледелия, увеличивается содержание гидрофобных компонентов ПОВ (Šimon et al., 2009), возрастает доля дискретного свободного и внутриагрегатного ПОВ (Vieira et al., 2007; Spargo et al., 2012; Plaza et al., 2013), молекулярный состав которого обогащен фенольными и ароматическими структурами, делая ПОВ более термически и биохимически устойчивым (Ndzelu et al., 2023).

Таким образом, одним из ведущих факторов деградации агрочерноземов выступает механическая обработка почвы – постоянный во времени и пространстве элемент традиционной технологии земледелия, под который создано множество почвообрабатывающих устройств, сеющих и уборочных механизмов. Воздействие на черноземы этих орудий традиционного земледелия с применением технологии прямого посева прекратилось: почва круглый год находится под покровом живой растительности и/или разлагающихся пожнивных остатков (Кирюшин и др., 2019). Применение ПП в черноземах выполняет также долгосрочную программу восстановления деградированных свойств, в том числе связанную с химическим строением ОВ. Строение ПОВ определя-

ет его биодоступность, регулирует численность и структуру микробного сообщества, влияет на агрофизические свойства почвы (Weil, Magdoff, 2004; Murphy et al., 2011). Оценка строения ПОВ крайне необходима для понимания механизмов стабилизации углерода и прогнозирования процессов трансформации в условиях различного землепользования (Холодов и др., 2023). На данный момент времени эта проблема разработана недостаточно, поскольку основное внимание сосредоточено на балансе ОВ.

В качестве объекта для исследований выбран чернозем типичный, формирующийся на мощных лёссовидных покровных отложениях Среднерусской возвышенности, репрезентативный по свойствам и в отношении применяемого зернового севооборота. На примере 8-летнего полевого опыта изучены основные химические свойства, а также химическое строение ПОВ черноземов при обеих технологиях, применяемых в земледелии региона.

Цель работы – оценить влияние прямого посева и традиционной технологии земледелия на химическое строение ОВ черноземов типичных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования расположен в Курском районе Курской области (п. Черемушки, N 51°37',53 с.ш.; E 36°15',44 в.д.). В 2013–2016 гг. на базе ФГБНУ “Курский ФНАЦ” был заложен на четырех полях опыт (каждый год последовательно закладывалось по одному полю) с целью изучения минимизации обработок и применения прямого посева. На полях, каждое размером 2.4 га, преобладающим подтипом почв являлись черноземы типичные, встречаемость которых на поле 1 составляла 95.5%, на поле 2 – 70.2%, на поле 3 – 88.2% и на поле 4 – 74.0% (рис. 1, схема опыта на поле 2) (Белобров и др., 2021).

Схема опыта включала 4 варианта, каждый размером 60 × 100 м: традиционную обработку (далее ТО) – вспашку с оборотом пласта на глубину 20 см, комбинированную обработку (дискование + чизель) на глубину 20 см, минимальную поверхностную обработку (дискование) до 8 см, а также прямой посев (далее ПП), в котором обработка почв не применяется. В рамках заложенного опыта использовался 4-польный севооборот: озимая

пшеница – кукуруза – ячмень – горох. В варианте ПП почвопокровные культуры не применяли. Удобрения и пестициды вносили в соответствии с рекомендациями для каждой культуры фоном по всем вариантам опыта. При применении технологии ПП использовали специализированную сеялку “Дон 114” (3.6 м). В 2022 г., после окончания второй ротации, т. е. через 8 лет, на поле 2 были отобраны образцы на наиболее контрастных вариантах опыта – ПП и ТО в 5-кратной повторности (рис. 1) с двух глубин – 0–10 см и 10–20 см – почвенным буром с буровым стаканом длиной 20 см и диаметром 5 см.



Рис. 1. Ортофотоплан объекта исследования. Буквами обозначены технологии: **a** – прямой посев, **b** – минимальная обработка, **c** – комбинированная обработка, **d** – традиционная обработка.

Fig. 1. Orthophotoplan of the object of study. The letters indicate the technologies: **a** – no-till, **b** – minimal tillage, **c** – combined tillage, **d** – traditional tillage.

В ходе работы изучали показатели кислотности почвы, содержание подвижных форм фосфора и калия, общего азота ($N_{\text{общ}}$), органического углерода ($C_{\text{орг}}$), а также химическое строение ПОВ методами ИК-спектроскопии и аналитического пиролиза.

Актуальную и обменную кислотность почвы оценивали в водной и солевой вытяжках (1М р-р KCl) методом прямой потенциометрии в соответствии с межгосударственными стандартами (ГОСТ 26483-85, 1986; ГОСТ 26423-85, 1986).

Определение подвижных соединений фосфора и калия проводили по методу Мачигина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91, 1993).

Содержание $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$ определяли методом каталитического окисления в токе кислорода при температуре +960 °C на элементном анализаторе vario-MACRO cube (Elementar, Германия) (ISO, 1995). Значения актуальной кислотности (pH_{H_2O}) всех образцов были < 7, реакция на содержание карбонатов отрицательная, поэтому весь определенный углерод был отнесен к органическому (Пансю, Готеру, 2014) .

Анализ методом инфракрасной спектроскопии в режиме диффузного отражения (DRIFTS) проводили на приборе FT-801 с приставкой PRIZ (Симэкс, Россия) в диапазоне 550–4 000 см^{-1} . Перед анализом образцы почвы дополнительно нагревали до 105 °C в течение 15 мин. с целью удаления адсорбированной влаги на анализаторе влажности BM-50-1 (BioBase, Китай). Все спектры снимали при разрешении 2 см^{-1} , каждый спектр образца получен путем усреднения 36 сканов. Влияние H_2O и CO_2 минимизировали путем вычитания опорного спектра из спектра образца и автоматической коррекции спектра в области 2 240–2 400 и 663–674 см^{-1} в ПО ZaiR 3.5 (Симэкс, Россия). Для получения опорного спектра использовали металлическое опорное зеркало, для получения спектров образцов почву помещали в алюминиевую кювету диаметром 12 мм, поверхность выравнивали предметным стеклом. Образцы почвы не разбавляли бромидом калия. Обработку спектров проводили в программной среде R с применением пакетов dplyr (Wickham et al., 2023), gsignal (Van Boxtel et al., 2021). Полученные спектры сглаживали фильтром Савицкого-Голея, разметку полос поглощения проводили по вторым производным. Интенсив-

ности всех полос нормировали на общую сумму интенсивностей, получая относительные интенсивности.

Аналитический пиролиз ПОВ проводили в режиме одностадийного нагрева почвенного образца при температуре 500 °C на пиролизере EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories, Япония). Разделение и детектирование продуктов пиролиза проводили методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором GCMS-QP2010 (Shimadzu, Япония). Температура инжектора составляла 300 °C, для инъекции газовой пробы в хроматографическую колонку применяли режим с делением потока (1 : 5). Для разделения газовой смеси использовали капиллярную хроматографическую колонку GsBP-5MS (Gs-Tek, США) длиной 30 м. Температурный режим хроматографирования заключался в постепенном нагреве термостата от 40 до 300 °C со скоростью 40 °C/мин. и экспозиции при максимальной температуре в течение 3 мин. Для ионизации молекул применяли метод электронного удара при 70 эВ. Детекцию проводили с помощью квадрупольного масс-филтра в диапазоне 45–600 m/z. Деконволюцию пирогамм осуществляли на платформе веб-сервиса GNPS (Global Natural Products Social Molecular Networking) (Aksenov et al., 2021), идентификацию пиков – в программе MS Search (версия 2.0, FairCom Co., США) с помощью библиотеки масс-спектров NIST11 (National Institute of Standards and Technology, США). Для полуколичественной оценки содержания пиролизатов применяли метод внутренней нормализации (De la Rosa et al., 2008).

Статистический анализ данных и визуализацию проводили с помощью языка программирования R в среде разработки RStudio с помощью пакетов ggplot2 (Wickham, 2016), factoextra (Kassambara, Mundt, 2022), corrplot (Dago et al., 2019). Для разведочного анализа использовали метод главных компонент, сравнение по группам проводили с помощью двухфакторного дисперсионного анализа, взаимосвязь показателей химического состава почв оценивали методом корреляции Пирсона. Уровень значимости принимали 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химические свойства черноземов типичных различных тех-

нологий земледелия в опыте после второй ротации представлены в таблице 1. Все изученные черноземы имеют слабокислые величины рН, характеризующие обменную и актуальную кислотности, а также очень высокую степень обеспеченности по подвижному фосфору и низкую на границе со средней обеспеченностью по подвижному калию. Содержание органического углерода и общего азота соответствует значениям, характерным для пахотных черноземов региона (Фрид и др., 2010).

В результате 8-летнего применения технологий изменился ряд показателей, характеризующих основные свойства черноземов при ТО и ПП. Прежде всего это сказывается на варьировании свойств почв. В ПП на обеих глубинах (0–10 и 10–20 см) отмечается более низкий показатель стандартного отклонения по сравнению с традиционной технологией, что характеризует их устойчивость в пространстве. Этот показатель косвенно указывает на отсутствие обработок в ПП. Кроме того, в ПП на глубине 10–20 см незначительно снизился рН (H_2O) на две десятых, что может указывать на изменения водного режима в поверхностном слое гумусового горизонта, в котором снижается вертикальная фильтрация влаги, а форма агрегатов приобретает субгоризонтальную ориентацию (Юдин и др., 2023). Заметна отчетливая тенденция увеличения содержания C_{org} при ПП, по сравнению с ТО, на обеих глубинах.

Для изучения строения ПОВ проведена оценка интенсивности 15 полос поглощения, преимущественно характеризующих ПОВ (табл. 2). На рисунке 2 показано расположение черноземов в координатах первых двух главных компонент в зависимости от относительной интенсивности полос поглощения в диапазоне ИК-излучения. В совокупности первые две главные компоненты (ГК) практически полностью (92.8%) описывают дисперсию данных, при этом около 83% дисперсии описывает ГК1. Хорошо выраженной кластеризации типичных черноземов в зависимости от технологии обработки почвы и глубины пробоотбора не выявлено. При этом заметно, что практически все точки, характеризующие варианты ПП и ТО на глубине 0–10 см, расположены в разных частях ГК1: точки, характеризующие ПП, – в положительной области, а ТО – в отрицательной.

Таблица 1. Химические свойства черноземов*

Table 1. Chemical properties of chernozems*

Вариант	Глубина, см	pH _{KCl}	pH _{H2O}	P, мг/кг	K, мг/кг	C _{орг} , %	N _{общ} , %
ПП	0–10	5.4 ± 0.3	6.5 ± 0.3	73 ± 9	128 ± 3	2.79 ± 0.13	0.252 ± 0.009
ТО		5.4 ± 0.7	6.6 ± 0.7	92 ± 18	199 ± 93	2.68 ± 0.20	0.239 ± 0.008
ПП	10–20	5.36 ± 0.22	6.3 ± 0.4	99 ± 9	213 ± 17	3.03 ± 0.09	0.258 ± 0.008
ТО		5.4 ± 0.7	6.5 ± 0.6	88 ± 14	247 ± 98	2.9 ± 0.3	0.257 ± 0.027

Примечание. */n = 5, среднее значение ± стандартное отклонение.

Note. */n = 5, mean value ± standard deviation.

Таблица 2. Характеристика полос поглощения спектров DRIFT чернозема типичных вариантов ТО и ПП (Margenot и др., 2015; Volkov и др., 2021).

Table 2. Characteristics of absorption bands of DRIFT chernozem spectra of typical variants of CT and NT

Полоса, см ⁻¹	Неорганические компоненты	Органические компоненты
1 064	Кварц, алюмосиликаты (Al-O, Si-O)	Валентные колебания C-O-C фенолов и простых эфиров, валентные колебания C-OH полисахаридов
1 095	Кварц, алюмосиликаты (Si-O), P-O	C-O-C фенолов и простых эфиров, валентные колебания C-OH полисахаридов
1 191	Аморфный кремнезём, составная полоса SiO ₂	Валентные колебания C-O-C спиртов, простых эфиров и фенолов, валентные колебания OH, деформационные колебания CH ₂
1 277	Составная полоса SiO ₂	Валентные колебания C-O карбоксильных кислот, фенолов, простых эфиров, валентные колебания C-N, деформационные колебания CH ₂
1 343	—	Валентные колебания C-O простых эфиров, деформационные колебания CH ₂
1 419	Mg-OH	Валентные колебания C-O фенолов, деформационные колебания OH
1 546	Составная полоса SiO ₂	Валентные колебания C=C ароматических молекул
1 574	—	Деформационные колебания C-H ароматических молекул

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Полоса, см⁻¹	Неорганические компоненты	Органические компоненты
1 615	H ₂ O, обертон SiO ₂	Валентные колебания C=C ароматических молекул, валентные колебания C-O карбоксилов, валентные колебания C=O кетонов, деформационные колебания N-H
1 645	H ₂ O	Валентные колебания C=O кетонов, амидов, валентные колебания C=C ароматических молекул
1 732	–	Валентные колебания C=O карбониллов
1 790	Составная полоса SiO ₂	Валентные колебания C=O
1 815	–	Валентные колебания C=O
2 876	–	Валентные колебания C-H алифатических соединений
2 962	Обертон SiO ₂	Валентные колебания C-H алифатических соединений

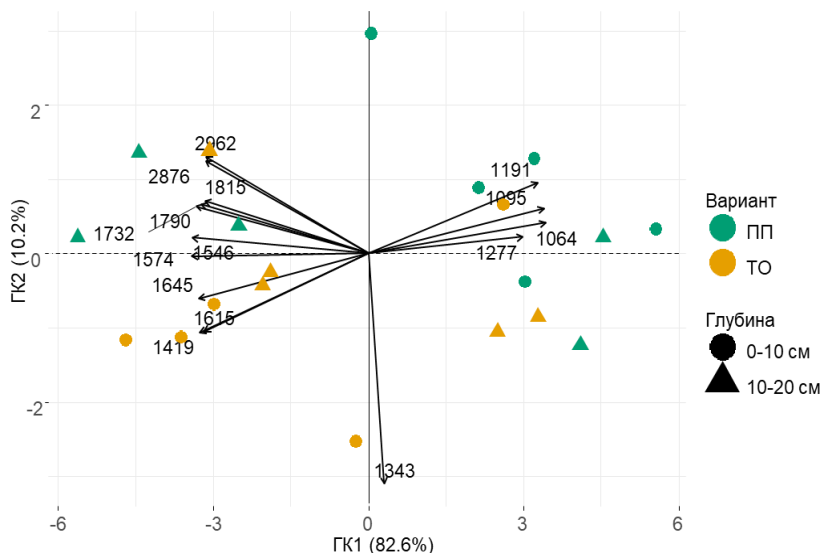


Рис. 2. Расположение точек, характеризующих объекты исследования, на плоскости первых двух главных компонент в зависимости от интенсивности полос поглощения спектров DRIFT.

Fig. 2. Principal component analysis (PCA) ordination based on relative intensities of the absorption bands of the DRIFT spectra, showing significantly different chemical structure of the SOM of chernozems under various cultivation technologies.

По аналогичной закономерности точки (без разделения по глубине пробоотбора) расположены относительно ГК2. Таким образом, точки ПП тяготеют к 1-му квадранту, а ТО – к 3-му квадранту (рис. 2).

Глубина пробоотбора не оказала значимого влияния на относительную интенсивность полос поглощения. Значимое влияние технологии обработки почвы выявлено только для полосы $1\,343\text{ см}^{-1}$ (увеличивается в ТО), связанной с валентными колебаниями С-О простых эфиров и деформационными колебаниями CH_2 (табл. 2).

Группа точек, соответствующих варианту ПП, дискримини-

руется от остальных по относительной интенсивности полос 1 064–1 277 см^{-1} , соответствующих валентным колебаниям фенолов, простых эфиров, азотсодержащих соединений и полисахаридов. Поскольку черноземы вариантов ТО и ПП принадлежат одному подтипу и варьирование их свойств невелико (табл. 1), то выявленную закономерность можно объяснить именно различиями в технологии обработки.

Группа точек, соответствующих варианту ТО, дискриминируется от остальных по относительной интенсивности полос 1 574–1 615 см^{-1} , соответствующих устойчивым к микробной деградации карбонильным, карбоксильным и ароматическим соединениям. Накопление этих компонентов ПОВ в варианте ТО относительно варианта ПП может свидетельствовать также о более активной минерализации ПОВ при ТО (Šimon et al., 2009) вследствие разрушения почвенных агрегатов и увеличения площади поверхности контакта с атмосферным воздухом и солнечной радиацией. Таким образом, для варианта ПП наблюдается накопление компонентов ПОВ предположительно растительного происхождения, что позволяет сделать вывод о возможности применения ПП для реализации ресурсосберегающих агротехнологий, в то время как ТО приводит к более интенсивной деградации ПОВ.

Результаты на основе данных по ИК-спектроскопии имеют определенные ограничения. Отсутствие значимых различий в интенсивности полос поглощения (за исключением 1 343 см^{-1}) может быть связано с мешающим влиянием минеральной матрицы почвы, особенно в области 1 000–1 200 см^{-1} . С этим же может быть связан значительный разброс точек на пространстве ГК (рис. 2). В настоящее время предложены методы уменьшения ее влияния за счет удаления ПОВ прокаливанием и последующим вычитанием спектра прокаленной почвы из спектра исходной почвы, или растворения минеральной матрицы раствором HF. Однако эти процедуры могут приводить к значительному искажению спектров и усложнению интерпретации полученных результатов. В связи с этим данные ИК-спектроскопии следует дополнять результатами других методов анализа ПОВ.

По результатам аналитического пиролиза черноземов типичных было идентифицировано 33 пиролизата, относящихся к

алифатическим, ароматическим углеводородам (УВ), а также гетероатомным соединениям. На рисунке 3 показано расположение объектов исследования в координатах первых двух главных компонент в зависимости от состава пиролизатов ПОВ. На рисунке видна тенденция к кластеризации черноземов в зависимости от технологии обработки почвы. Заметно, что пиролизаты ПОВ варианта ТО в основном состоят из ароматических УВ, а пиролизаты ПОВ ПП – из кислородсодержащих гетероциклов (фурфурол и метилбензофуран).

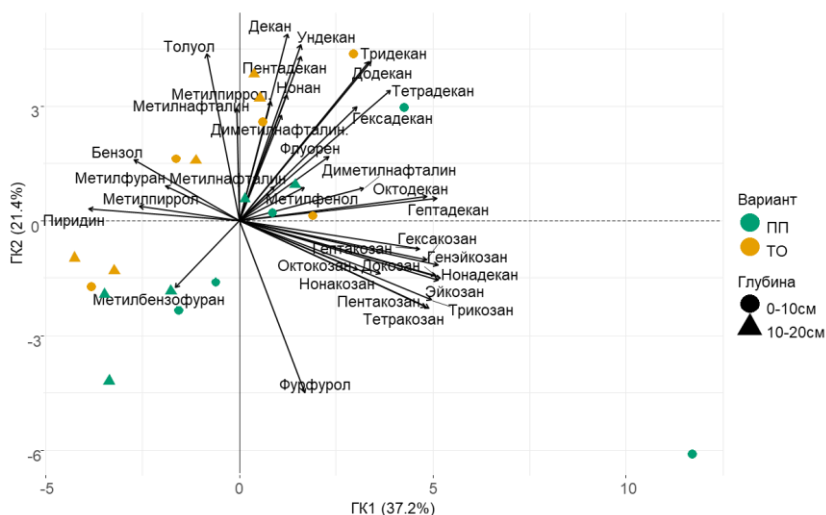


Рис. 3. Расположение точек, характеризующих объекты исследования, на плоскости первых двух главных компонент в зависимости от состава пиролизатов ПОВ.

Fig. 3. Principal component analysis (PCA) ordination based on relative abundances of SOM pyrolysates showing significantly different chemical structure of the SOM of chernozems under various cultivation technologies.

Для детальной интерпретации результатов аналитического пиролиза ПОВ его продукты были разделены на группы по химическому строению и происхождению: азотсодержащие соединения, полициклические ароматические УВ (ПАУ), моноцикличе-

ские ароматические УВ (МАУ), алканы, фенолы, фураны. На рисунке 4 показано относительное содержание выделенных групп пиролизатов ПОВ в зависимости от технологии обработки и глубины пробоотбора. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа показано влияние глубины пробоотбора на содержание азотсодержащих соединений в составе пиролизатов ПОВ.

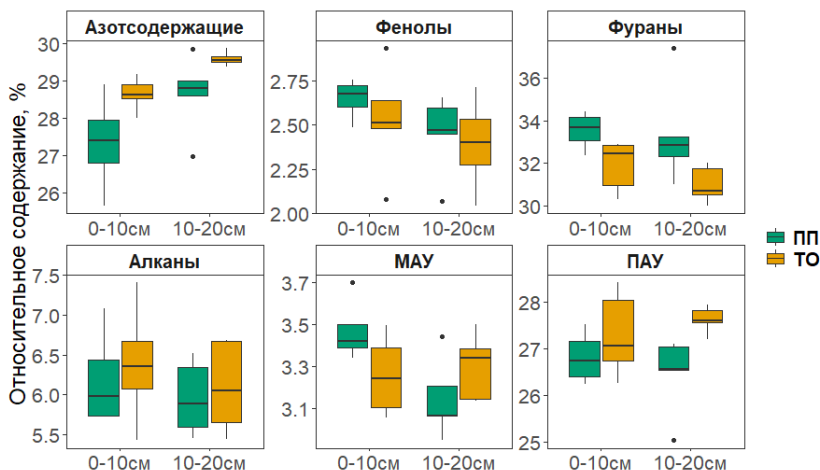


Рис. 4. Относительное содержание пиролизатов ПОВ.

Fig. 4. Relative abundance of SOM pyrolysates.

Технология обработки влияет на относительное содержание азотсодержащих соединений, фуранов и ПАУ. Обилие азотсодержащих пиролизатов ПОВ в слое 10–20 см независимо от технологии обработки почвы вызвано накоплением сильно трансформированных компонентов микробного происхождения, а также обеднением “свежим” ОВ растительного происхождения по сравнению с поверхностным слоем почвы (Wynn et al., 2006). Высокое обилие азотсодержащих компонентов ПОВ в варианте ТО, вероятно, обусловлено интенсивной минерализацией растительных остатков, поступающих в почву, в результате чего растет доля стабильных компонентов ПОВ микробного происхождения. С точки зрения формирования ПОВ, высокое обилие ароматических УВ может

свидетельствовать о наличии высококонденсированных молекул, например, блэк карбон (Rumpel et al., 2007). Также не стоит исключать тот факт, что ароматические УВ образуются в результате циклизации и ароматизации алифатических компонентов ПОВ при пиролизе, интенсивность этого процесса будет зависеть от условий пиролиза и состава ПОВ образца (Moldoveanu, 2019). Высокое обилие ПАУ в составе пиролизатов ПОВ характерно для варианта ТО. Такая закономерность может свидетельствовать о накоплении компонентов пассивного пула ОВ, не участвующих в трансформации ОВ, в условиях интенсивной минерализации ОВ при ТО (Холодов и др., 2020).

Высокое относительное содержание фуранов в варианте ПП, по сравнению с ТО, скорее всего, связано с накоплением продуктов микробной трансформации ПОВ (Saiz-Jimenez, De Leeuw, 1986; Huang et al., 1998), в частности углеводов, основными пиролизатами которых являются фураны (Collard, Blin, 2014; Zhao et al., 2017). В пользу этой интерпретации может указывать то, что применение технологии ПП создает благоприятные условия питания и увлажнения для высокой физиологической активности микроорганизмов (Blevins et al., 1971; Aziz et al., 2013). Группа фенолов была представлена одним соединением – метилфенолом; доля этого пиролизата имеет тенденцию к возрастанию от ТО к ПП, что указывает на накопление полифенолов, а также лигнина – компонентов, активно участвующих в почвенной секвестрации углерода (Blanco-Canqui, Lal, 2004). Относительное содержание МАУ и алканов в составе пиролизатов ПОВ по вариантам опыта и глубине пробоотбора достоверно не различалось.

Таким образом, химическое строение ОВ черноземов типичных по данным аналитического пиролиза указывает на то, что с увеличением глубины пробоотбора растет доля сильно трансформированного ПОВ микробного происхождения. При ТО в черноземах накапливаются компоненты пассивного пула ОВ. Применение ПП на черноземах приводит к накоплению свежего ОВ и продуктов его микробной трансформации.

На рисунке 5 представлена корреляционная матрица, отражающая силу и характер взаимосвязи изученных химических свойств черноземов, а также показателей химического строения

ПОВ по данным ИК-спектрометрии и аналитического пиролиза. В ячейках корреляционной матрицы показаны только значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0.05$). Рассчитанные значения коэффициентов корреляции указывают на среднюю силу взаимосвязи изученных переменных. Отсутствие сильных взаимосвязей, близких к функциональным, связано с ограничениями методов химического анализа ПОВ, а также сложностью состава ПОВ. Эти факторы в совокупности обуславливают наличие неоднозначности в интерпретации аналитических данных о его химическом строении.

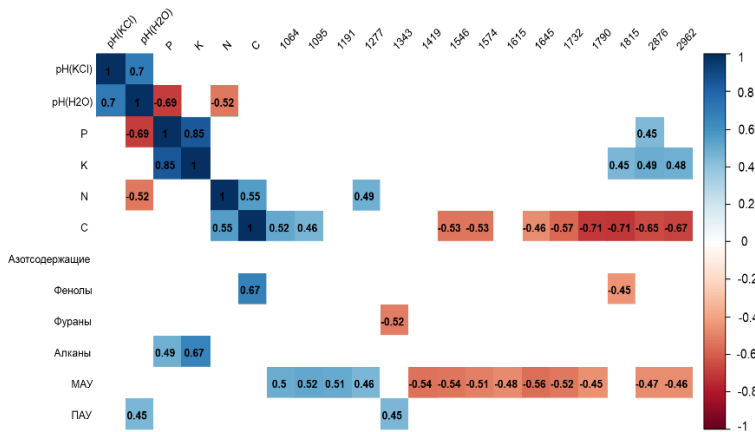


Рис. 5. Тепловая корреляционная матрица, характеризующая взаимосвязи изученных химических свойств черноземов типичных.

Fig. 5. The heatmap correlation matrix characterizing the relationships of the studied chemical properties of typical chernozems.

Показано, что содержание подвижных форм фосфора и калия положительно коррелирует с относительной интенсивностью полос поглощения 1 815, 2 876, 2 962 cm^{-1} , а также с относительным содержанием алканов среди пиролизатов ПОВ. Такая закономерность, может быть, связана с тем, что доступные формы эле-

ментов питания стимулируют активность микробной биомассы, тем самым усиливают минерализацию ПОВ, в процессе которого происходит накопление алифатических УВ, вероятно, коротко- и среднецепочечных жирных кислот, относящихся к почвенным липидам (Розенцвет и др., 2019; Yang et al., 2022). Также это может быть связано с положительным влиянием доступности элементов питания на интенсивность корневой экссудации растений, продукты которой обогащены соединениями алифатического строения (Vives-Peris et al., 2020). Содержание общего азота закономерно коррелирует с относительной интенсивностью полосы $1\,277\text{ см}^{-1}$, которая связана с валентными колебаниями связи C-N. Корреляционной зависимости $N_{\text{общ}}$ с относительным содержанием азотсодержащих пиролизатов ПОВ не выявлено. Содержание $C_{\text{орг}}$ положительно коррелирует с относительными интенсивностями полос поглощения $1\,064$, $1\,095\text{ см}^{-1}$, а также обратно зависит от относительных интенсивностей изученных полос поглощения в диапазоне $1\,546\text{--}2\,962\text{ см}^{-1}$ за исключением полосы $1\,615\text{ см}^{-1}$. Это может свидетельствовать о том, что накопление органического углерода в почве сопровождается увеличением доли углеводов в почве, в то время как его потеря – увеличением доли окисленных (карбоксильные, карбонильные) и ароматических соединений ПОВ. Увеличение доли других алифатических соединений (полосы $2\,850\text{--}2\,950\text{ см}^{-1}$) может быть связано с устойчивостью сорбированных почвенных липидов к минерализации в условиях ТО.

Похожая закономерность наблюдается во взаимосвязи между долей МАУ среди пиролизатов ПОВ и значениями относительных интенсивностей полос поглощения ПОВ. Среди пиролизатов ПОВ только доля фенолов имела устойчивую положительную корреляцию с содержанием органического углерода. На основе этого блока информации мы предполагаем, что формирование МАУ при пиролизе ПОВ частично обусловлено наличием фенольных соединений, а также, что накопление углерода в черноземах происходит за счет увеличения в составе ПОВ фенольных соединений в результате поступления лигнина (Blanco-Canqui, Lal, 2004). Значение относительной интенсивности полосы $1\,343\text{ см}^{-1}$ отрицательно коррелировало с долей фуранов и положительно коррелировало с долей ПАУ среди пиролизатов ПОВ. Основывая-

ясь на данных аналитического пиролиза, можно предположить, что эта полоса поглощения может характеризовать некоторые компоненты пассивного пула ПОВ. Результаты корреляционного анализа подтверждают обоснованность подхода к разделению ароматических УВ по количеству бензольных ядер: МАУ и ПАУ. Таким образом, корреляционный анализ изученных характеристик ПОВ позволил выявить взаимосвязи содержания некоторых биофильных макроэлементов с химическим строением ПОВ по данным ИК-спектromетрии и аналитического пиролиза, оценить особенности формирования продуктов пиролиза ПОВ и предложить показатели для оперативного мониторинга процессов трансформации ПОВ по данным ИК-спектromетрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование почвенных свойств при смене условий почвообразования носит накопительный характер, поэтому для доказательных исследований требуется изучение многолетних полевых опытов. В ходе работы по оценке влияния традиционной технологии земледелия и прямого посева на химические свойства типичных черноземов в рамках 8-летнего полевого опыта показано, что наиболее чувствительным показателем трансформации свойств почвы является химическое строение ПОВ. Вне зависимости от применяемой агротехнологии формирование ПОВ на разных глубинах пробоотбора носит различный характер. В строении ПОВ черноземов типичных поверхностного слоя (0–10 см) заметен значительный вклад компонентов растительного происхождения и продуктов их трансформации. В подповерхностном слое почвы (10–20 см) возрастает роль компонентов микробного происхождения, а также компонентов, относящихся к пассивному пулу ПОВ. Процессы трансформации ПОВ под влиянием ТО и ПП происходят преимущественно в поверхностном слое почвы 0–10 см. Роль агротехнологии в формировании структуры ПОВ черноземов связана с различиями в их микробиологической активности. Особенно строения ПОВ чернозема в условиях ПП вызваны заметным накоплением углеводов, а также продуктов их микробной трансформации, наблюдается тенденция к накоплению соединений фенольной природы. Применение ТО приводит к доминированию в

структуре ПОВ компонентов пассивного пула, не участвующих в процессах микробной трансформации. Отсутствие значимой разницы в содержании органического углерода между вариантами ПП и ТО, вероятно, связано с тем, что в исследуемом опыте технология ПП не включала применение почвопокровных культур, обеспечивающих дополнительное разнообразие агрокультур в севообороте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука. 2005. 223 с.
2. Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Ермолаев Н.Р., Лебедева М.П., Абрисимов К.Н., Борисочкина Т.И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный, прямой посев, Курская область. опыт, ротация 1.1 / под ред. А.Л. Иванова. М.: ГЕОС, 2021. 123 с.
3. Дридигер В.К., Иванов А.Л., Белобров В.П., Кутовая О.В. Восстановление свойств почв в технологии прямого посева // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1111–1120.
4. Иванов А.Л., Кулинцев В.В., Дридигер В.К., Белобров В.П. О целесообразности освоения системы прямого посева на черноземах России // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 4. С. 8–16.
5. Иванов А.Л., Куст Г.С., Донник И.М., Бедрицкий А.И., Багиров В.А., Козлов Д.Н., Савин И.Ю., Алымбаева Ж.Б., Андреев С.Г., Андреева О.В. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Т. 2. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 476 с.
6. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Москва. 2021. № 107. С. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>.
7. Кирюшин В.И., Дридигер В.К., Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Козлов Д.Н., Кирюшин С.В., Конищев А.А. Методические рекомендации по разработке минимальных систем обработки почвы и прямого посева / М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 136 с.
8. Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб: ЦОП “Профессия”, 2014. 800 с.

9. Розенцвет О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 2. С. 161–177.
10. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Иванов А.Л., Ильин Л.И., Колесникова Л.Г., Петросян Р.Д., Шилов П.М., Филь П.П., Корчагин А.А. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0. Иваново: “ПресСто”, 2021. 259 с.
11. Столбовой В.С., Молчанов Э.Н. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России как модель пространственной организации почвенного покрова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 5. С. 135–143.
12. Фрид А.С. и др. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
13. 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. № 117. С. 52–100. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.
14. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. Т. 8. С. 970–982.
15. Холодов В.А., Ярославцева Н.В. Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС, 2021. 119 с.
16. Юдин С.А., Плотникова О.О., Белобров В.П., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Ермолаев Н.Р. Количественная характеристика микростроения типичных черноземов при использовании разных агротехнологий // Почвоведение. 2023. Т. 6. С. 774–786.
17. ГОСТ 26423-85. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. 1986.
18. ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО. 1986.
19. ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. 1993.
20. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. 1986. 7 с.

21. ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. 1986. 7 с.
22. Aksenov A.A. *et al.* Auto-deconvolution and molecular networking of gas chromatography–mass spectrometry data // *Nature Biotechnology*. 2021. Vol. 39. No 2. P. 169–173.
23. Aziz I., Mahmood T., Islam K.R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality // *Soil and Tillage Research*. 2013. Vol. 131. P. 28–35.
24. Blanco-Canqui H., Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2004. Vol. 23. No 6. P. 481–504.
25. Blevins R.L., Cook D., Phillips S.H., Phillips R.E. Influence of No-tillage on Soil Moisture // *Agronomy Journal*. 1971. Vol. 63. No 4. P. 593–596.
26. Collard F.-X., Blin J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 38. P. 594–608.
27. Dago N.D. *et al.* A Quick Computational Statistical Pipeline Developed in R Programing Environment for Agronomic Metric Data Analysis // 2019. Vol. 9. No 4. P. 22–44.
28. De la Rosa J.M., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vazquez R., Knicker H., Lopez-Capel E., Manning D.A.C., Gonzalez-Vila F.J. Use of pyrolysis / GC-MS combined with thermal analysis to monitor C and N changes in soil organic matter from a Mediterranean fire affected forest // *Catena*. 2008. Vol. 74. No 3. P. 296–303.
29. Huang Y., Eglinton G., Van der Hage E.R.E., Boon J.J., Bol R., Ineson P. Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques // *European Journal of Soil Science*. 1998. Vol. 49. No. 1. P. 1–15.
30. ISO. ISO 10694:1995. Soil quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). 1995.
31. Kan Z.-R., Liu W.-X., Liu W.-S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.-L. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 693–710.
32. Kassambara A., Mundt F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. 2022. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra>.
33. Margenot A.J., Calderón F.J., Bowles T.M., Parikh S.J., Jackson L.E. Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields //

Soil Science Society of America Journal. 2015. Vol. 79. No. 3. P. 772–782.

34. *Murphy D.V., Cookson W.R., Braimbridge M., Marschner P., Jones D.L., Stockdale E.A., Abbott L.K.* Relationships between soil organic matter and the soil microbial biomass (size, functional diversity, and community structure) in crop and pasture systems in a semi-arid environment // *Soil Research*. 2011. Vol. 49. No. 7. P. 582–594.

35. *Ndzelu B.S., Dou S., Zhang X., Zhang Y.* Molecular composition and structure of organic matter in density fractions of soils amended with corn straw for five years // *Pedosphere*. 2023. Vol. 33. No. 2. P. 372–380.

36. *Plaza C., Courtier-Murias D., Fernández J.M., Polo A., Simpson A.J.* Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 57. P. 124–134.

37. *Pyrolysis of organic molecules: applications to health and environmental issues / Moldoveanu S.C. (Ed.).* Amsterdam: Elsevier Science Bv., 2019. 711 p.

38. *Rumpel C., González-Pérez J.A., Bardoux G., Largeau C., Gonzalez-Vila F.J., Valentin C.* Composition and reactivity of morphologically distinct charred materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils // *Organic Geochemistry*. 2007. Vol. 38. No. 6. P. 911–920.

39. *Saiz-Jimenez C., De Leeuw J.W.* Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1986. Vol. 9. No. 2. P. 99–119.

40. *Šimon T., Javůrek M., Mikanová O., Vach M.* The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity // *Soil and Tillage Research*. 2009. Vol. 105. No. 1. P. 44–48.

41. *Spargo J.T., Cavigelli M.A., Alley M.M., Maul J.E., Buyer J.S., Sequeira C.H., Follett R.F.* Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of no-tillage management // *Soil Science Society of America Journal*. 2012. Vol. 76. No. 5. P. 1624–1633.

42. *Van Boxtel G., Laboissière R., Wilhelm H.D.* gsignal: Signal processing. 2021. URL: <https://github.com/gjmvvanboxtel/gsignal>.

43. *Vieira F.C.B., Bayer C., Zanatta J.A., Dieckow J., Mieleniczuk J., He Z.L.* Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 96. No. 1. P. 195–204.

44. *Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M.* Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond // *Plant Cell Reports*. 2020. Vol. 39. No. 1. P. 3–17.

45. Volkov D.S., Rogova O.B., Proskurnin M.A. Organic matter and mineral composition of silicate soils: ftr comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1879.
46. Weil R., Magdoff F. Significance of soil organic matter to soil quality and health // *Soil organic matter in sustainable agriculture*. 2004. P. 1–43.
47. Wickham H. ggplot2: Elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.
48. Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D. dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.1.4. 2023. URL: <https://github.com/tidyverse/dplyr>.
49. Wynn J.G., Harden J.W., Fries T.L. Stable carbon isotope depth profiles and soil organic carbon dynamics in the lower Mississippi Basin // *Geoderma*. 2006. Vol. 131. No. 1. P. 89–109.
50. Yang S., Jansen B., Absalah S., Kalbitz K., Chunga Castro F.O., Cammeraat E.L.H. Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands // *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 215. P. 105203.
51. Zhao C., Jiang E., Chen A. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin // *Journal of the Energy Institute*. 2017. Vol. 90. No. 6. P. 902–913.

REFERENCES

1. Aleksandrovsky A.L., Aleksandrovskaya E.I., *Evolutsiya pochv i geograficheskaya sreda* (Evolution of soils and geographical environment), Moscow: Nauka, 2005, 223 p.
2. Belobrov V.P., Yudin S.A., Aidiev A.Ya., N.R. E., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Borisochkina T.I., Voronin A.Ya., Plotnikova O.O., *Chernozem tipichnyy. pryamoy posev, Kurskaya oblast'. opyt, rotatsiya 1.1* (Typical chernozem. No-till, Kursk region. experience, rotation 1.1), A.L. Ivanov (Ed.), Moscow: GEOS, 2021, 123 p.
3. Dridiger V.K., Ivanov A.L., Belobrov V.P., Kutovaya O.V., *Vosstanovleniye svoystv pochv v tekhnologii pryamogo poseva* (Restoration of soil properties in no-till technology), *Soil Science*, 2020, No. 9, pp. 1111–1120.
4. Ivanov A.L., Kulintsev V.V., Dridiger V.K., Belobrov V.P., *O tselesoobraznosti osvoyeniya sistemy pryamogo poseva na chernozemakh Rossii* (On the feasibility of developing a direct sowing system on Russian chernozems), *Achievements of science and technology of the agro-industrial*

complex, 2021, Vol. 35, No. 4, pp. 8–16.

5. Ivanov A.L., Kust G.S., Donnik I.M., Bedritsky A. I., Bagirov V.A., Kozlov D.N., Savin I.Yu., Alymbaeva Zh.B., Andreev S.G., Andreeva O.V., *Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: opustynivaniye i degradatsiya zemel', institutsional'nyye, infrastrukturnyye, tekhnologicheskiye mery adaptatsii (sel'skoye i lesnoye khozyaystvo)* (Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)), Vol. 2, Moscow: OOO “Izdatelstvo MBA”, 2019, 476 p.

6. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin A.Yu., Kozlov D.N., Bamatov I.M., Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 107, pp. 5–32, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>.

7. Kiryushin V.I., Driediger V.K., Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Kozlov D.N., Kiryushin S.V., Konishchev A.A., *Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke minimal'nykh sistem obrabotki pochvy i pryamogo poseva* (Methodological recommendations for the development of minimal tillage systems and no-till), Moscow: : OOO “Izdatelstvo MBA”, 2019, 136 p.

8. Pansyu M., Goterou J., *Analiz pochvy. Spravochnik. Mineralogicheskiye, organicheskiye i neorganicheskiye metody analiza* (Soil analysis. Directory. Mineralogical, organic and inorganic methods of analysis), St. Petersburg: TsOP “Profession”, 2014, 800 p.

9. Rozentsvet O.A., Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., Lipidnyye biomarkery v ekologicheskoy otsenke pochvennoy bioty: analiz zhirnykh kislot (Lipid biomarkers in the ecological assessment of soil biota: analysis of fatty acids), *Uspekhi sovremennoy biologii Advances in modern biology*, 2019, Vol. 139, No. 2, pp. 161–177.

10. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Ivanov A.L., Ilyin L.I., Kolesnikova L.G., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Fil P.P., Korchagin A.A., *Reyestr indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossiyskoy Federatsii. Versiya 1.0* (Register of indicators of soil quality in agricultural lands of the Russian Federation. Version 1.0), Ivanovo: “PresSto”, 2021, 259 p.

11. Stolbovoy V.S., Molchanov E.N., Yedinyy gosudarstvennyy reyestr pochvennykh resursov Rossii kak model' prostranstvennoy organizatsii pochvennogo pokrova (Unified state register of soil resources of Russia as a model of spatial organization of soil cover), *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2015, No. 5, pp. 135–143.

12. Frid A.S. et al., *Zonal'no-provintsial'nyye normativy izmeneniy agrokhimicheskikh, fiziko-khimicheskikh i fizicheskikh pokazateley osnovnykh*

pakhotnykh pochv territorii Rossii pri antropogennykh vozdeystviyakh (Zonal-provincial standards for changes in agrochemical, physicochemical and physical indicators of the main arable soils of the territory of Russia under anthropogenic influences), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2010, 176 p.

13. 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>.

14. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Aidiev A.Yu., Lazarev V.I., Ilyin B.S., Ivanov A.L., Kulikova N.A., Termolabil'noye i termostabil'noye organicheskoye veshchestvo chernozemov raznogo zemlepol'zovaniya (Thermolabile and thermostable organic matter of chernozems of different land uses), *Pochvovedeniye*, 2020, Vol. 8, pp. 970–982.

15. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., *Agregaty i organicheskoye veshchestvo pochv vosstanavlivayushchikhsya tsenozov* (Aggregates and organic matter of soils of recovering cenoses), Moscow: GEOS, 2021, 119 p.

16. Yudin S.A., Plotnikova O.O., Belobrov V.P., Lebedeva M.P., Abrosimov K.N., Ermolaev N.R., *Kolichestvennaya kharakteristika mikrostroyeniya tipichnykh chernozemov pri ispol'zovanii raznykh agrotekhnologiy* (Quantitative characteristics of the microstructure of typical chernozems using different agricultural technologies), *Pochvovedeniye*, 2023, Vol. 6, pp. 774–786.

17. GOST 26423-85, *Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, rN i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki* (Methods for determining specific electrical conductivity, pH and solid residue of aqueous extract), 1986.

18. GOST 26483-85, *Pochvy. Prigotovleniye solevoy vytyazhki i opredeleniye yeye pH po metodu TSINAO* (Soils. Preparation of a salt extract and determination of its pH using the TsINAO method), 1986.

19. GOST 26205-91, *Pochvy. Opredeleniye podvizhnykh soyedineniy fosfora i kaliya po metodu Machigina v modifikatsii* (Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium using the Machigin method modified by TsINAO), 1993.

20. GOST 26423-85, *Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki* (Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH and solid residue of aqueous extract), 1986, 7 p.

21. GOST 26483-85, *Pochvy. Prigotovleniye solevoy vytyazhki i opredeleniye*

- yeye pH по методу TSINAO (Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH using the TsINAO method), 1986, 7 p.
22. Aksenov A.A. et al., Auto-deconvolution and molecular networking of gas chromatography–mass spectrometry data, *Nature Biotechnology*, 2021, Vol. 39, No. 2, pp. 169–173.
23. Aziz I., Mahmood T., Islam K.R., Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality, *Soil and Tillage Research*, 2013, Vol. 131, pp. 28–35.
24. Blanco-Canqui H., Lal R., Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates Critical, *Reviews in Plant Sciences*, 2004, Vol. 23, No. 6, pp. 481–504.
25. Blevins R.L., Cook D., Phillips S.H., Phillips R.E., Influence of no-tillage on soil moisture, *Agronomy Journal*, 1971, Vol. 63, No. 4, pp. 593–596.
26. Collard F.-X., Blin J., A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol. 38, pp. 594–608.
27. Dago N.D. et. al., A quick computational statistical pipeline developed in r programing environment for agronomic metric data analysis, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 22–44.
28. De la Rosa J.M., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vazquez R., Knicker H., Lopez-Capel E., Manning D.A. C., Gonzalez-Vila F.J., Use of pyrolysis/GC-MS combined with thermal analysis to monitor C and N changes in soil organic matter from a Mediterranean fire affected forest, *Catena*, 2008, Vol. 74, No. 3, pp. 296–303.
29. Huang Y., Eglinton G., Van der Hage E.R. E., Boon J.J., Bol R., Ineson P., Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques, *European Journal of Soil Science*, 1998, Vol. 49, No. 1, pp. 1–15.
30. ISO. ISO 10694:1995, Soil quality, Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), 1995.
31. Kan Z.-R., Liu W.-X., Liu W.-S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.-L., Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective, *Global Change Biology*, 2022, Vol. 28, No. 3, pp. 693–710.
32. Kassambara A., Mundt F., factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses, 2022, URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra>.
33. Margenot A.J., Calderón F.J., Bowles T.M., Parikh S.J., Jackson L.E., Soil organic matter functional group composition in relation to organic carbon, nitrogen, and phosphorus fractions in organically managed tomato fields, *Soil*

Science Society of America Journal, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 772–782.

34. Murphy D.V., Cookson W.R., Braimbridge M., Marschner P., Jones D.L., Stockdale E.A., Abbott L.K., Relationships between soil organic matter and the soil microbial biomass (size, functional diversity, and community structure) in crop and pasture systems in a semi-arid environment, *Soil Research*, 2011, Vol. 49, No. 7, pp. 582–594.

35. Ndzelu B.S., Dou S., Zhang X., Zhang Y., Molecular composition and structure of organic matter in density fractions of soils amended with corn straw for five years, *Pedosphere*, 2023, Vol. 33, No. 2, pp. 372–380.

36. Plaza C., Courtier-Murias D., Fernández J.M., Polo A., Simpson A.J., Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 57, pp. 124–134.

37. Moldoveanu S.C. (Ed.), *Pyrolysis of organic molecules: applications to health and environmental issues*, Amsterdam: Elsevier Science Bv, 2019, 711 p.

38. Rumpel C., González-Pérez J.A., Bardoux G., Largeau C., Gonzalez-Vila F.J., Valentin C., Composition and reactivity of morphologically distinct charred materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils, *Organic Geochemistry*, 2007, Vol. 38, No. 6, pp. 911–920.

39. Saiz-Jimenez C., De Leeuw J.W., Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1986, Vol. 9, No. 2, pp. 99–119.

40. Šimon T., Javůrek M., Mikanová O., Vach M., The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity, *Soil and Tillage Research*, 2009, Vol. 105, No. 1, pp. 44–48.

41. Spargo J.T., Cavigelli M.A., Alley M.M., Maul J.E., Buyer J.S., Sequeira C.H., Follett R.F., Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of no-tillage management, *Soil Science Society of America Journal*, 2012, Vol. 76, No. 5, pp. 1624–1633.

42. Van Boxtel G., Laboissière R., Wilhelm H.D., gsignal: Signal processing, 2021, URL: <https://github.com/gjmvanboxtel/gsignal>.

43. Vieira F.C.B., Bayer C., Zanatta J.A., Dieckow J., Mielniczuk J., He Z.L., Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems, *Soil and Tillage Research*, 2007, Vol. 96, No. 1, pp. 195–204.

44. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M., Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond, *Plant Cell Reports*, Vol. 39, No. 1, pp. 3–17.

45. Volkov D.S., Rogova O.B., Proskurnin M.A., Organic matter and mineral composition of silicate soils: FTIR comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities, *Agronomy*, 2021, Vol. 11, No. 9, p. 189.
46. Weil R., Magdoff F., Significance of soil organic matter to soil quality and health, *Soil organic matter in sustainable agriculture*, 2004, pp. 1–43.
47. Wickham H., ggplot2: Elegant graphics for data analysis, New York: Springer-Verlag, 2016.
48. Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D., dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.1.4, 2023, URL: <https://github.com/tidyverse/dplyr>.
49. Wynn J.G., Harden J.W., Fries T.L., Stable carbon isotope depth profiles and soil organic carbon dynamics in the lower Mississippi Basin, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, No. 1, pp. 89–109.
50. Yang S., Jansen B., Absalah S., Kalbitz K., Chunga Castro F.O., Cammeraat E.L.H., Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands, *Soil and Tillage Research*, 2022, Vol. 215, pp. 105–203.
51. Zhao C., Jiang E., Chen A., Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin, *Journal of the Energy Institute*, 2017, Vol. 90, No. 6, pp. 902–913.