

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-184-223



Ссылки для цитирования:

Артемьева З.С., Когут Б.М. Лабильные и стабильные компоненты органического вещества в почвах агроландшафтов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 124. “Почвенное органическое вещество”. С. 184-223. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-184-223

Cite this article as:

Artemyeva Z.S., Kogut B.M., Labile and stable organic matter components in agricultural soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 124, “Soil organic matter”, pp. 184-223, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-184-223

Лабильные и стабильные компоненты органического вещества в почвах агроландшафтов

© 2025 г. З. С. Артемьева*, Б. М. Когут**

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

*<https://orcid.org/0000-0001-9781-9351>, e-mail: artemyevazs@mail.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>, e-mail: kogutb@mail.ru.

Поступила в редакцию 13.03.2025, после доработки 24.04.2025,
принята к публикации 21.07.2025

Резюме: Представлен анализ литературы по лабильным и стабильным компонентам органического вещества (ОВ) в почвах земель сельскохозяйственного назначения. К лабильным относятся легкие фракции (ЛФ), выделяемые по плотности частиц ($<1.6\text{--}1.8\text{ г/см}^3$), а к стабильным – илистые фракции (Ил), выделяемые по размеру частиц ($<1\text{--}2\text{ мкм}$). Лабильные компоненты ОВ весьма, а стабильные – мало чувствительны к изменению систем земледелия и землепользования. Вследствие этого соотношение углерода лабильного и стабильного пулов – индекс $S_{\text{ЛФ}}/S_{\text{Ил}}$ применяется в качестве индикатора качества ОВ почв агроландшафтов. Для выделения лабильных и стабильных компонентов ОВ применяются физические методы фракционирования почвы, характеризующиеся большой трудоемкостью, и поэтому для массового использования они малопригодны. Предложены теоретически обоснованные экспресс-показатели ОВ, которые возможно рассчитать на

основе данных, получаемых с помощью предлагаемого авторами достаточно простого гранулометрического метода фракционирования. Эти экспресс-показатели ОВ (масса и С фракций < 10 мкм) будут характеризоваться различной биогеохимической стабильностью, и их применение в целях долгосрочного и оперативного углеродного мониторинга в почвах представляется весьма перспективным. Рекомендована экспериментальная апробация теоретически аргументированных упрощенных показателей с целью выявления среди них корректных индикаторов, наиболее адекватно отражающих влияние природных и антропогенных факторов в различных временных масштабах на качество ОВ почв.

Ключевые слова: органическое вещество почвы; лабильное ОВ; стабильное ОВ.

Labile and stable organic matter components in agricultural soils

© 2025 Z. S. Artemyeva*, B. M. Kogut**

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

*<https://orcid.org/0000-0001-9781-9351>, e-mail: artemyevazs@mail.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-0565-2812>, e-mail: kogutb@mail.ru.

Received 13.03.2025, Revised 24.04.2025, Accepted 21.07.2025

Abstract: The article presents an analysis of the literature on labile and stable components of organic matter (OM) in agricultural soils. The labile components include light fractions (LF) identified by particle density ($< 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), while the stable components include clay fractions (Clay) identified by particle size ($< 1\text{--}2 \text{ }\mu\text{m}$). Labile components of OM are very sensitive, while stable components are insensitive to changes in farming and land use systems. As a result, the ratio of carbon in the labile and stable pools, the $C_{\text{LF}}/C_{\text{Clay}}$ ratio, is used as an indicator of the OM quality in agricultural landscapes. Physical soil fractionation methods used to isolate labile and stable components of OM are laborious and, therefore, not suitable for regional and global scale studies. The proposed theoretically substantiated express indicators of OM can be obtained using the proposed fairly simple granulometric fractionation method. These express indicators of OM will be characterized by different biogeochemical stability and their application for long-term and operational carbon monitoring in soils seems very promising. Experimental verification of theoretically justified simplified indicators is

recommended in order to identify among them the correct indicators that most adequately reflect the impact of native and anthropogenic factors on the soil OM quality at different time scales.

Keywords: soil organic matter; labile OM; stable OM.

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям почвенное органическое вещество (ПОВ) – это система разноразмерных органических частиц и биомолекул растительного, животного и микробного происхождения, находящихся в свободном, агрегированном и связанном почвенными минералами состоянии (Семенов, Когут, 2015; Когут и др., 2021).

История изучения ОВ почв насчитывает более 200 лет, в течение которых менялись и подходы его изучения, и терминология. Так, химическое фракционирование ПОВ водной вытяжкой, солевыми растворами, в щелочных и кислотных средах, различными органическими растворителями позволяет дифференцировать органический континуум почвы по прочности внутренних химических связей слагаемых компонентов и внешних – с минеральными частицами почвы. Физическое фракционирование по размеру и плотности частиц позволяет распознать природу и тесноту присоединения органических веществ к минеральным частицам, объемную конфигурацию органо-минеральных комплексов, расположение органических веществ в конгломерате частиц, выступающих физическим барьером для почвенных микроорганизмов. Биологическое фракционирование дает интегральное представление о доступности микроорганизмам почвенного органического вещества. В силу многокомпонентности, гетерогенности и полифункциональности ПОВ нет, и, вероятно, не может быть единого и универсального метода фракционирования, отвечающего всем требованиям и ситуациям и раскрывающего все механизмы стабилизации ПОВ (Когут, Семенов, 2015; Семенов, Когут, 2015).

Остановимся немного на истории развития принципов и методов фракционирования ОВ в почвах, и прежде всего, в Почвенном институте им. В.В. Докучаева, ученые которого – И.В. Тюрин, М.М. Кононова, Д.В. Хан и М.Ш. Шаймухаметов – сыграли ключевую роль в этой области исследования ПОВ.

Известно, что, начиная с 30-х и вплоть до 90-х гг. прошлого столетия, при изучении ОВ почв доминировало химическое фракционирование, у истоков которого стоял академик Иван Владимирович Тюрин (Тюрин, 1937; Иванов и др., 2017). Именно он впервые ввел термин **“подвижные гумусовые вещества”** для определения гумусовых веществ (ГВ), экстрагируемых непосредственно децинормальной NaOH (0.1 N NaOH) вытяжкой (без декальцирования), представляющих 1-ю фракцию, согласно классическим схемам фракционирования.

В 1949 г. М.М. Кононова с соавторами предложили использовать содержание и состав подвижных ГВ в качестве показателя трансформации (изменчивости) ОВ в черноземах при антропогенном воздействии (Кононова и др., 1949).

Позднее, в 70–80-е гг. XX в., К.В. Дьяконова (Рекомендации для исследования баланса..., 1984) для подвижных ГВ рекомендовала другой термин – **“лабильные ГВ”**, к которым отнесла наиболее сильно меняющуюся под воздействием окультуривания / антропогенного воздействия фракцию в составе гумуса. К.В. Дьяконова предложила теоретические критерии для лабильных ГВ, к которым были отнесены:

- максимальная обогащенность их азотом, и, соответственно,
- наиболее узкая величина отношения C/N,
- наиболее высокая гидролизуемость в них азота.

Эти критерии свидетельствовали в пользу того, что лабильные ГВ – основные источники питания для растений. Следует отметить, что в современной литературе стал часто использоваться термин **“биодоступность”** ОВ, в котором дополнительно присутствует и критерий N/C.

Тогда же, под руководством К.В. Дьяконовой, сотрудники лаборатории органического вещества почв: В.С. Булеева, Н.Х. Исмагилова и Б.М. Когут (Оценка почв по содержанию и качеству гумуса ..., 1990), рекомендовали дифференцированный подход к выделению лабильных ГВ в разных типах почв:

- для черноземов предлагалось их извлечение 1 N NaOH (без декальцирования), а
- для дерново-подзолистых почв – 0.1 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (pH = 7).

Следует отметить, что для черноземов понятия **подвижные ГВ** по Тюрину и **лабильные ГВ** по Дьяконовой совпадают.

Параллельно с методами химического фракционирования в лаборатории биохимии почв с 50–60-х гг. Д.В. Ханом разрабатывались физические методы фракционирования, которые были сначала продолжены М.Ш. Шаймухаметовым, а затем им совместно с Н.А. Титовой и Л.С. Травниковой в 70–90-е гг. прошлого века.

Работами Д.В. Хана, М.Ш. Шаймухаметова, Л.С. Травниковой, Н.А. Титовой было показано, что в составе ОВ почвы присутствуют:

- трансформируемая часть (легкие фракции – ЛФ) и
- относительно стабильная часть (Ил).

В 70–90-е гг. методы исследования ОВ (химические и физические) дополнились биологическими. Как следствие, в зависимости от целей оценки качества и функций ОВ значительно расширилось количество терминов и понятий пулов и фракций ОВ: **активные / пассивные** (по времени оборачиваемости); **легко- / трудноразлагаемые** (способность к трансформации и регулированию агротехническими приемами); **лабильные / стабильные** (инертные) (чувствительность к биохимическому разложению и трансформации); **молодые / старые** (возраст формирования и разновременность обновления), **быстро / медленно циклирующие; незащищенные (свободные) / защищенные** (доступность микроорганизмам и устойчивость к биодеградации) и т. д.

Начиная с 90-х гг. в мировой литературе исследования с использованием физических методов фракционирования стали доминировать над таковыми с использованием химических методов экстрагирования.

В 1991 г. Р. Тейт (Тейт, 1991) предложил условно разделить ПОВ на две части:

1. изменяющуюся и
2. неизменяющуюся при сельскохозяйственном использовании.

В 2003 г. Б.М. Когут выдвинул принципиально важное условие при делении ОВ почвы на эти 2 части, указав, что необходимо обязательно уточнять метод их фракционирования (химиче-

ское или физическое) (Когут, 2003). Позднее к этим двум методам дифференцированного подхода добавилось и биологическое фракционирование (Семенов и др., 2006). Это обусловлено тем фактом, что выделяемые разными методами фракционирования части ОВ несут различную, но взаимодополняющую информацию (Когут и др., 2004; Когут и др., 2012; Семенов, Когут, 2015; Delahaie et al., 2024; Schiedung et al., 2025).

С 90-х гг. прошлого столетия появилось множество методов физического фракционирования (гранулометрических (по размеру), денсиметрических (по плотности), а также их сочетание), с разным количеством выделяемых фракций, с применением различных разделяющих жидкостей (неорганических, органических): йодид калия (KI), бромформ (CHBr_3), а в настоящее время при денсиметрическом фракционировании в качестве тяжелой жидкости широко используют поливольфрамат натрия ($\text{Na}_6\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}$).

Для выделения денсиметрических фракций (легкие фракции – ЛФ), окклюдированных в агрегатах почвы, обязательна процедура их разрушения. Для диспергации почвы используют химические и физические методы (например, взбалтывание в гексаметафосфате натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) со стеклянными шариками в течение 16 часов, ультразвуковая диспергация).

Согласно обстоятельному обзору Pöchlauer et al. (2018), комбинация фракционирования ОВ по размеру и плотности частиц является наиболее распространенной.

Метод Шаймухаметова, Травниковой (1984) относится к фракционированию по размеру и плотности (гранулоденсиметрия), в котором в качестве разделяющей жидкости используется бромформ-этанольная смесь (БЭС), а для диспергирования почвы применяется ультразвук. В таблице 1 представлены первоначальный вариант метода (1984), а также его последующие модификации.

Таблица 1. Сведения о грануло-денсиметрическом фракционировании (Шаймухаметов, Травникова, 1984) и его модификациях

Table 1. Information on granulo-densimetric fractionation (Shaimukhametov, Travnikova, 1984) and its modifications

Год	Авторы	Размер	Плотность	Фракции
1984	Шаймухаметов, Травникова	1 мкм	1.8 г/см ³ 2.0 г/см ³	ЛФ (<1.8 г/см ³) ЛФ (1.8–2.0 г/см ³) Ил (<1 мкм) Остаток
2001	Травникова, Артемьева	1 мкм	1.8 г/см ³ 2.0 г/см ³	ЛФ _{СВ} (<1.8 г/см ³): > 50 мкм < 50 мкм ЛФ _{АГР} (<1.8 г/см ³): > 50 мкм < 50 мкм ЛФ (1.8–2.0 г/см ³) Ил (<1 мкм) Остаток

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Год	Авторы	Размер	Плотность	Фракции
2021	Artemyeva et al.	1 мкм	1.8 г/см ³	ЛФ _{СВ} (<1.8 г/см ³) ЛФ _{АГР} (<1.8 г/см ³) Ил (<1 мкм) Остаток

Примечание. Легкая фракция (ЛФ) в определенной степени соответствует Particulate Organic Matter – POM в зарубежной литературе.

Note. Light fraction (LF) to a certain extent corresponds to Particulate Organic Matter – POM in foreign literature.

После исследования фракций, выделяемых модифицированным методом (Травникова, Артемьева, 2001), под электронным микроскопом, фракция ЛФ ($1.8\text{--}2.0\text{ г/см}^3$) из схемы фракционирования была исключена в силу того, что она оказалась практически полностью минеральной. Кроме того, количество выделяемых фракций ($n = 7$) превышало их рекомендуемое / оптимальное количество – 4–6 (согласно Roerlau et al., 2018). В связи с этим, руководствуясь гипотезой о большей важности места локализации ЛФ в почвенной матрице (ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР}) по сравнению с возможными различиями их качественного состава, обусловленными размером, процедура деления легких фракций по размеру (50 мкм) в следующей модификации метода (Artemyeva et al., 2021) была исключена (табл. 1).

ЛАБИЛЬНЫЕ И СТАБИЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Свободное ОВ (ЛФ_{СВ} плотностью $< 1.8\text{ г/см}^3$ и размером $> 50 / 53\text{ мкм}$) – аналог РОМ_{free} – локализуется в межагрегатном поровом пространстве почвы. Исследования под электронным микроскопом показали, что оно отличается гетерогенностью качественного состава, несмотря на гомогенность, фиксируемую невооруженным глазом. ЛФ_{СВ} представляет собой смесь хорошо различимых фрагментов неразложившихся остатков (растительные клетки, ткани и т. д.), может включать и остатки отмершей микробиоты и продукты их разложения размером $> 50\text{ (}53, 63\text{) мкм}$ в разных вариантах фракционирования, выделенных методом флотации с помощью разных диспергаторов (химических или физических) (например, Cambardella, Elliott, 1992; Golchin et al., 1994; Six et al., 1998; 1999; Baisden et al., 2002; Carter, 2002; John et al., 2005; Kölbl et al., 2005; Yamashita et al., 2006; Zimmermann et al., 2007; Olchin et al., 2008; Vitro et al., 2008 и проч.) (рис. 1).

Доминирующая часть ЛФ_{СВ} представлена легкодоступным (за исключением углистых веществ) для микробиологического разложения энергетическим материалом (Balesdent et al., 2000). В силу отсутствия физической защиты (локализации в межагрегатном поровом пространстве) свободное ОВ позиционируется как

наиболее быстроразлагаемое ОБ (лабильное) (Cambardella, Elliott, 1992; Six et al., 1999; Solomon et al., 2000; von Lützow et al., 2007). По данным разных авторов, среднее время пребывания (MRT) этой фракции исчисляется периодом от 0.5 до 3–6 лет (Andren, Paustian, 1987; Trumbore, 1997; 2009; Silver, Miya, 2001; Baisden et al., 2002; Adair et al., 2008; Hurisso et al., 2013).

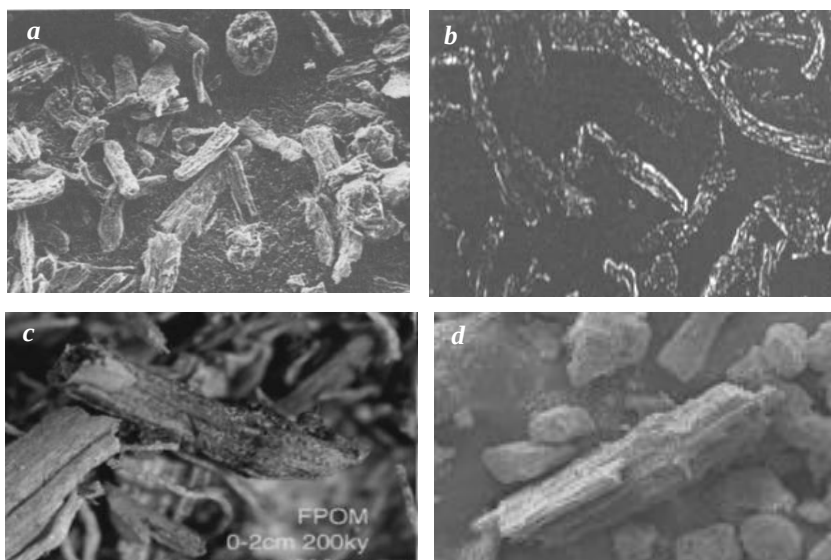


Рис. 1. Изображение фракции свободного ОБ (ЛФ_{св}) (ЛФ плотностью < 1.6–1.8 г/см³): **a** – Cambardella, Elliott (1992); **b** – Golchin et al. (1994); **c** – Baisden et al. (2002); **d** – Артемьева, Федотов (2013).

Fig. 1. Digital images of the Free OM (LF_{fr}) (density < 1.6–1.8 g·cm⁻³): **a** – Cambardella, Elliott, 1992; **b** – Golchin et al. (1994); **c** – Baisden et al. (2002); **d** – Artemyeva, Fedotov (2013).

Агрегированное ОБ почвы (ЛФ_{агр}) представлено ЛФ с плотностью < 1.8 г/см³ и размером < 50 / 53 мкм) – аналог РОМ_{осс}, локализуется в поровом пространстве неустойчивых в ультразвуковом (УЗ) поле микроагрегатов (50 / 53 – 250 мкм) и, соответственно, физически защищено от микробиологических атак

(Golchin et al., 1994; Six et al., 1998; Christensen, 2001). ЛФ_{АГР}, как правило, рассматривается как промежуточный пул ОБ между свободным ОБ и ОБ, стабилизированным глинистыми частицами (Christensen, 2001; Six et al., 2002). Оно отличается от свободного ОБ, в первую очередь, по морфологическим характеристикам. Визуально фракция представляет собой достаточно гомогенную однородную порошкообразную массу черного цвета (рис. 2). Электронно-микроскопический анализ показал значительно бóльшую степень разложения органического материала, по сравнению с ЛФсв. Тем не менее, фрагменты растительного материала достаточно хорошо различимы.



Рис. 2. Изображение фракции окклюдированного ОБ (ЛФ_{окк}) (ЛФ плотностью $< 1.8 \text{ г/см}^3$): **a** – Golchin et al. (1994); **b** – Baisden et al. (2002); **c** – Артемьева, Федотов (2013).

Fig. 2. Digital images of the Occluded OM (LF_{окк}) (density $< 1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$): **a** – Golchin et al. (1994); **b** – Baisden et al. (2002); **c** – Artemyeva, Fedotov (2013).

По данным разных авторов, MRT этой фракции колеблется в диапазоне от 12 до 50–100 лет (Jenkinson, Coleman, 1994; Jastrow et al., 1996, 1998; Parton, 1996; Trumbore, 1997, 2009; Bol et al., 2009; Mueller, Kögel-Knabner, 2009).

ОБ органо-глинистых комплексов ($< 1 \text{ мкм}$) – аналог Mineral-Associated Organic Matter, MAOM (минерально-ассоциированное ОБ размером $< 1(2) \text{ мкм}$), – в которых органические соединения прочно связаны с глинистыми минералами и оксидами-гидроксидами Fe и Al; они представляют физико-химически стабилизированный пул ОБ почвы (Six et al., 1998, 2002; Chenu, Plante, 2006; Kumar et al., 2013; Beare et al., 2014).

Наряду с ЛФ_{АГР}, ОВ органо-глинистых комплексов также входит в состав неустойчивых в ультразвуковом (УЗ) поле микроагрегатов размером 50 / 53 – 250 мкм.

Электронно-микроскопический анализ показал, что илистая фракция представляет собой ламелярные частицы, уложенные параллельно друг другу по базальным плоскостям (рис. 3) (Федотов, Артемьева, 2015). ОВ, стабилизированное глинистыми частицами, адсорбировано на минералах < 1 мкм или локализовано внутри глинистых ультрамикроагрегатов размером < 1 мкм (Chenu, Plante, 2006).

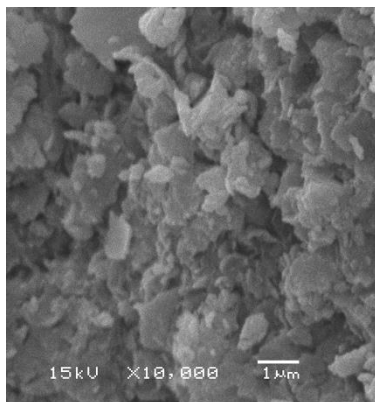


Рис. 3. Изображение илистой фракции (< 1 мкм) (Ил), выделенной из целинного чернозема.

Fig. 3. Digital image of the clay fraction (< 1 μm) (Clay) isolated from virgin Chernozem.

Среднее время MRT этой фракции исчисляется первыми сотнями лет (~100–200) (Laird et al., 2001; Virto et al., 2008, 2010; Heckman et al., 2018).

ОВ остатка после выделения ЛФ и органо-глинистых комплексов – фракция **Остаток** – аналог Mineral-Associated Organic Matter, МАОМ (минерально-ассоциированное ОВ размером 1 (2)–1 000 (2 000) мкм), визуальнo под микроскопом представляет со-

бой скопление грубообломочного минерального компонента, преимущественно фрагментов первичных минералов разного размера, с обильной присыпкой мелкоземистого компонента, представленного глинистыми минералами (хорошо различимы чешуйки глинистых минералов) (рис. 4) (Федотов, Артемьева, 2015).

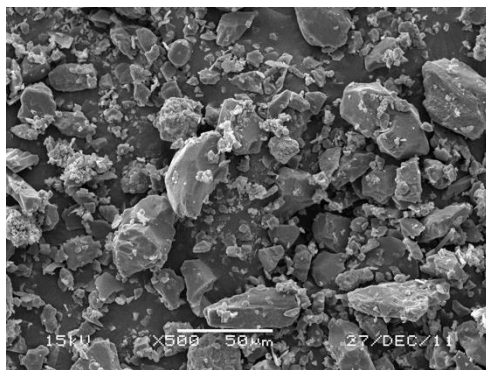


Рис. 4. Изображение фракции Остаток, выделенной из целинного чернозема.

Fig. 4. Digital image of the Residue fraction (Res) isolated from virgin Chernozem.

ОВ фракции Остаток представлено преимущественно ОВ в составе устойчивых в УЗ-поле (70 Дж/мл в течение 1 мин; 15 раз) ультрамикроагрегатов пылеватых фракций. Косвенные свидетельства присутствия такого рода ультрамикроагрегатов в пылеватых фракциях разных почв, подвергнутых слабой или средней степени диспергации, отмечаются разными авторами (Skjemstad et al., 1993; Shang, Tiessen, 1998; Roscoe et al., 2000; Gerzabek et al., 2001; Balabane, Plante, 2004; Plante et al., 2006; Virto et al., 2008, 2010). Предполагается, что ОВ пылеватых фракций стабилизировано как за счет физической окклюзии в ультрамикроагрегатах, так и физико-химической защиты, путем взаимодействия с минералами. В силу способности хранить самые старые и наиболее преобразованные органические частицы (Артемьева и др., 2023), именно ультрамикроагрегаты пылеватого размера играют весьма важную

роль в длительной стабилизации ОВ в почвах.

ОВ, стабилизированное в устойчивых (в УЗ-поле) ультра-микроагрегатах пылеватого размера фракции Остаток, рассматривается в качестве пассивного пула ОВ. MRT данной фракции исчисляется сотнями–тысячами лет (Trumbore, 1997, 2009).

Таким образом, дискретное ОВ ($ЛФ_{СВ} + ЛФ_{АГР}$ – аналог РОМ) представляет изменяющуюся / трансформируемую, в частности, при сельскохозяйственном использовании, а илистая фракция (Ил – аналог МАОМ) – неизменяющуюся / нетрансформируемую части ОВ в почвах.

Следовательно, физическое фракционирование по размеру и плотности частиц дает возможность разделить ОВ почвы на лабильный и относительно стабильный пулы.

Отношение углерода лабильного и стабильного пулов – индекс $С_{ЛФ}/С_{Ил}$ – давно и успешно используется в качестве индикатора качества ОВ почв агроландшафтов (например, Ганжара и др., 1990; Травникова и др., 1992; Gregorich et al., 1994; Когут, 1996; Травникова, 2002; Артемьева, 2008; Artemyeva, Kogut, 2016). Согласно Gregorich et al. (1994), возможность использования этого показателя в качестве индикатора качества ОВ обусловлена несколькими факторами: 1) поскольку эта фракция ОВ представлена не-/слабо разложенными остатками, преимущественно растительного происхождения, ее количество отражает баланс между вносимым и разлагаемым ОВ, что определяется условиями окружающей среды; 2) легкие фракции (ЛФ), при относительно небольших их количествах в почве (как правило, их количество не превышает 10%), концентрирует до 20–45% общего $С_{орг}$; 3) ЛФ – постоянный источник питательных элементов; 4) ЛФ наиболее чувствительны к изменению агротехники и систем севооборота.

Для экологической оценки почв по содержанию лабильной и стабильной частей ОВ (масса, %) была предложена типизация органо-глинистых комбинаций по двум базовым признакам (тип выделяется по гранулометрическому составу (содержание ила), подтип – по содержанию ЛФ плотностью $< 2 \text{ г/см}^3$) (табл. 2) (Артемьева и др., 2009).

Согласно предлагаемой типизации органо-глинистых комбинаций, почвы зонального ряда Центра Русской равнины делятся

на четыре типа:

I тип (малоглинистая комбинация) характеризуется средней и высокой степенью дегумусированности, высокой степенью дезагрегации, средней степенью деструктуризации, средней и высокой степенью переуплотнения. В наибольшей степени подвержен деградационным изменениям при различных агрогенных нагрузках.

II тип (среднеглинистая комбинация) отличается слабой и средней степенью дегумусированности, средней и высокой степенью дезагрегации, средней и высокой степенью деструктуризации и широким диапазоном по степени переуплотнения (от незначительной до высокой). В целом данный тип органо-глинистой комбинации, по сравнению с типом I, характеризуется большей степенью устойчивости к деградации. Однако он все же остается достаточно проблемным с точки зрения устойчивости к агрогенным нагрузкам.

III тип (многоглинистая комбинация) характеризуется слабой и средней степенью дегумусированности, слабой и средней степенью дезагрегации, широким диапазоном по степени деструктуризации (от слабой до высокой включительно), незначительной и слабой степенью переуплотнения. В целом данный тип органо-глинистой комбинации оценивается как достаточно устойчивый к агрогенным нагрузкам.

IV тип (гиперглинистая комбинация) отличается слабой и средней степенью дегумусированности, слабой и средней степенью дезагрегации, слабой и средней степенью деструктуризации и слабой степенью переуплотнения. Наиболее устойчив к агрогенным нагрузкам.

Индекс $C_{лф}/C_{ил}$ релевантно отражает качественные изменения ОВ в разных типах почв Центра Русской равнины при разном землепользовании (рис. 5). Очевидна тенденция к уменьшению величины данного индекса по мере увеличения степени “нарушенности” почв и его восстановлению при снижении нагрузки (рис. 5).

Таблица 2. Двухфакторная типизация органо-глинистых комбинаций (Артемьева и др., 2009)

Table 2. Two factor typing of organo-clay combinations (Artemyeva et al., 2009)

Подтип, ЛФ*, % Тип, Ил, %	1 0–2	2 2–4	3 4–6	4 >6
I 0–10	малоглинистый обедненный	малоглинистый слабообогатенный	малоглинистый обогатенный	малоглинистый сверхобогатенный
II 10–20	среднеглинистый обедненный	среднеглинистый слабообогатенный	среднеглинистый обогатенный	среднеглинистый сверхобогатенный
III 20–30	многоглинистый обедненный	многоглинистый слабообогатенный	многоглинистый обогатенный	многоглинистый сверхобогатенный
IV 30–40	гиперглинистый обедненный	гиперглинистый слабообогатенный	гиперглинистый обогатенный	гиперглинистый сверхобогатенный

Примечание. * – легкие фракции с плотностью < 2 г/см³.

Note. * – light fractions (density < 2 g cm⁻³).

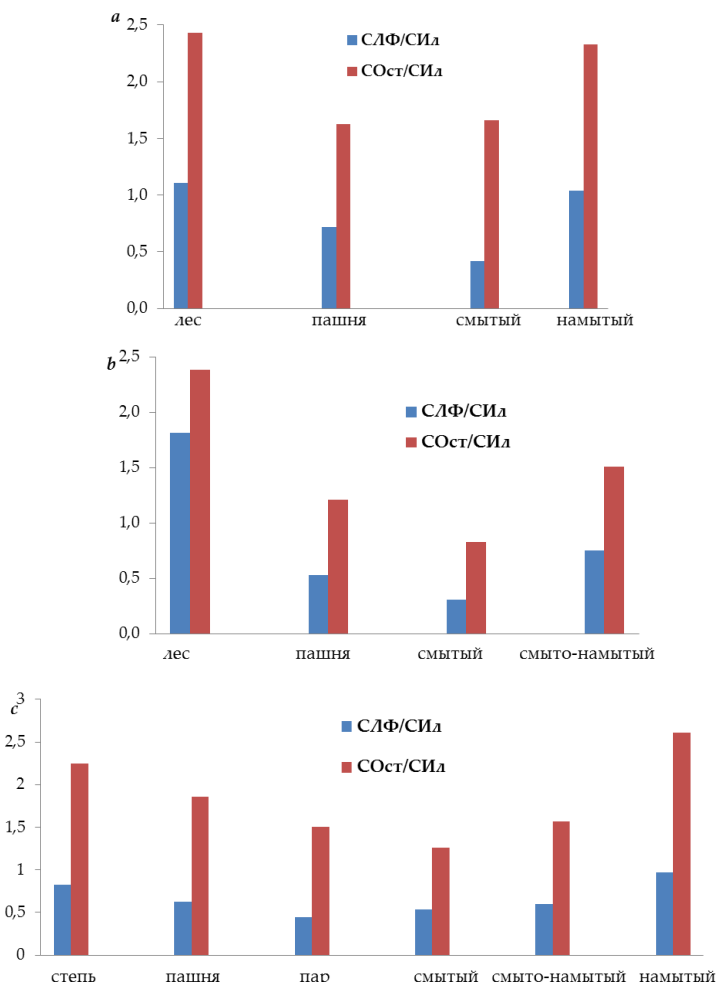


Рис. 5. Индексы C_{LF}/C_{Il} и C_{Ost}/C_{Il} в основных типах почв Центра Русской равнины: **a** – дерново-подзолистые почвы (n = 5); **b** – серые лесные (n = 6); **c** – черноземы (n = 11).

Fig. 5. Distribution of the C_{LF}/C_{Clay} and C_{Res}/C_{Clay} indices in the main soil types of the Central Russian Plain: **a** – Albeluvisols (n = 5); **b** – Phaeozems (n = 6); **c** – Chernozems (n = 11).

Таким образом, несмотря на то, что расширенные схемы фракционирования достаточно адекватно отражают реальный компонентный состав ОВ в почвенной матрице и демонстрируют свою информативность при фундаментальных исследованиях, для массового использования они малопригодны в силу своей трудоемкости, а, следовательно, и существенных финансовых расходов. В связи с этим исследователи неоднократно предпринимали попытки разработки ускоренной и простой процедуры фракционирования ОВ, приводящей к снижению трудоемкости получения индекса, близкого к $C_{\text{лф}}/C_{\text{ил}}$.

Так в 1992 г. Л.С. Травниковой с соавторами (Травникова и др., 1992) был разработан относительно простой способ, в соответствии с которым соотношение C основных фракций ОВ определяется по уровню их накопления в гранулометрических фракциях < 1 (2) мкм и в остатке после их выделения ($C_{\text{ост}}/C_{\text{ил}}$), который близок к современному, часто используемому в зарубежной, а в последнее время и в отечественной литературе, РОС/МАОС (отношение углерода в РОМ к углероду в МАОМ). Данный экспресс-метод Травниковой основан на простом гранулометрическом фракционировании почвы по размеру (> 1 мкм и < 1 мкм) с использованием ультразвуковой диспергации и центрифугирования (Шаймухаметов, Воронина, 1972). Этот ускоренный метод был успешно апробирован на образцах почв, отобранных в различных удобренных вариантах длительных полевых опытов дерново-подзолистых и черноземных почв России, бурых, буроземных и черноземных почв Германии. Выявлена достоверная корреляция ($r = 0.85$) между значениями показателей, полученными методами полного грануло-денсиметрического фракционирования и экспресс-методом (Травникова и др., 1992). Позднее экспресс-показатель $C_{\text{ост}}/C_{\text{ил}}$, определяемый с помощью этого упрощенного метода, был метрологически охарактеризован и рекомендован для проведения агроэкологического мониторинга гумусового состояния черноземов (Когут и др., 2002).

В связи с современными климатическими вызовами, связанными с проблемами парникового эффекта и потенциалом секвестрации C почвами, в последние десятилетия исследования по углеродному мониторингу почв получили новый импульс. В частно-

сти, такого рода работы были успешно реализованы в Германии (Poeplau, Don, 2023; Skadell et al., 2023), Швейцарии (Dupla et al., 2021; Guillaume et al., 2022), Англии и Уэльсе (Prout et al., 2021, 2022; Pulley et al., 2023), Франции (Delahaie et al., 2023; Rabot et al., 2024), Бразилии (Pinheiro Junior et al., 2024).

В зарубежной литературе по длительному мониторингу ПОВ наиболее часто применяют отношение POM/MAOM или POC/MAOC (von Lützow et al., 2007; Cotrufo et al., 2019; Lavallee et al., 2020; Angst et al., 2021, 2023; Vidal et al., 2021; Witzgall et al., 2021; Kögel-Knabner et al., 2022; Schlüter et al., 2022; Yu et al., 2022; Dobarco et al., 2023; Delahaie et al., 2023; Laub et al., 2024). Для выделения этих пулов ОБ (POM и MAOM) применяются разные физические методы фракционирования; из них наиболее потенциально релевантными для мониторинга почвы считаются метод разделения частиц по размеру (гранулометрический) и термический анализ (Delahaie et al., 2023). В качестве гранулометрического метода разделения частиц по размеру за рубежом широко используется метод Cambardella and Elliott (1992), который позволяет разделить ОБ по размеру (> 53 мкм и < 53 мкм), приравнивая эти фракции к POM (particulate OM) и MAOM (Mineral-associated OM) с использованием гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) для диспергирования.

Несмотря на высокую популярность данного метода, его, на наш взгляд, нельзя считать оптимальным для решения поставленной цели. В частности, используя схему Cambardella and Elliott (1992), в состав POM, помимо свободного ОБ (POM_{free}), попадает и часть окклюдированного ОБ в составе агрегатов (POM_{occ}). Это происходит в силу того, что свободное ОБ может быть представлено на 20–70% частицами размером < 50 мкм, а состав POM_{occ} может быть существенно “загрязнен” частицами POM размером > 50 мкм. Следовательно, количество POM может быть существенно занижено, а состав MAOM характеризуется чрезвычайно гетерогенным составом – в него попадет, помимо песка, пыли, глины и POM_{occ} , также и POM_{free} . В результате главное условие любого фракционирования – выделение наиболее однородных по качественному составу фракций при минимальном их количестве – соблюдается не в полной мере.

Напротив, схема Травниковой и др. (1992) позволяет выделить, по крайней мере, одну относительно гомогенную по качественному составу фракцию (Ил) при том же общем количестве фракций (2). Следовательно, с теоретических позиций, схема Травниковой и др. (1992), предположительно, должна более адекватно отражать изменения качественного состава ОВ почвы при разном землепользовании.

На основе расчета значений показателя $C_{\text{Ост}}/C_{\text{Ил}}$ (расширенная схема фракционирования) было установлено, что он описывает качественные изменения ОВ в разных типах почв Центра Русской равнины при разном землепользовании практически так же, как и индекс $C_{\text{ЛФ}}/C_{\text{Ил}}$ (рис. 6).

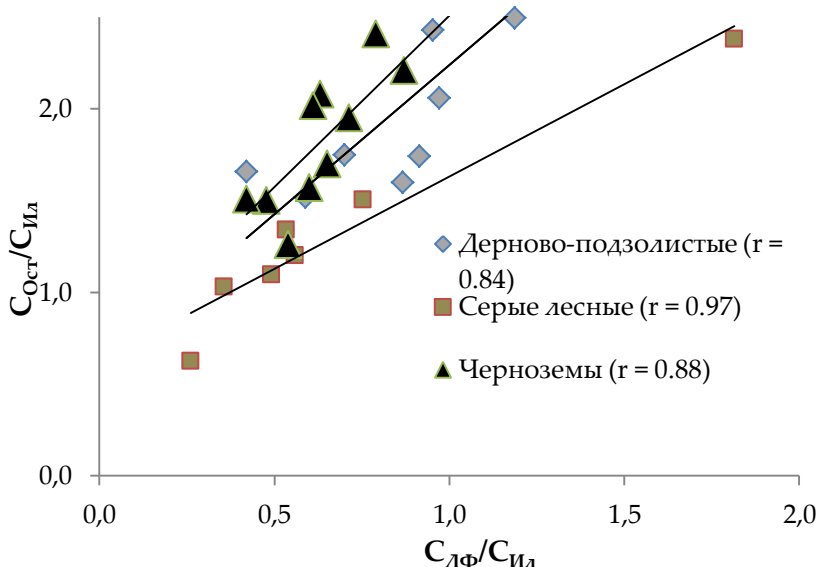


Рис. 6. Коэффициенты корреляции индексов $C_{\text{ЛФ}}/C_{\text{Ил}}$ и $C_{\text{Ост}}/C_{\text{Ил}}$ в основных типах почв Центра Русской равнины: дерново-подзолистые ($n = 9$); серые лесные ($n = 7$); черноземы ($n = 12$).

Fig. 6. Correlation coefficients between the $C_{\text{LF}}/C_{\text{Clay}}$ and $C_{\text{Res}}/C_{\text{Clay}}$ indices in the main soil types of the Central Russian Plain: Albeluvisols ($n = 9$); Phaeozems ($n = 7$); Chernozems ($n = 12$).

Более того, сравнительный анализ индексов $S_{\text{ЛФ}}/S_{\text{Ил}}$ и $S_{\text{Ост}}/S_{\text{Ил}}$ по данным полной схемы фракционирования показал очень тесную корреляцию между ними.

Коэффициент корреляции (r) между двумя индексами увеличивается в ряду: дерново-подзолистые (0.84) < черноземы (0.88) < серые лесные (0.97).

Таким образом, схема Травниковой и др. (1992), на наш взгляд, имеет явное преимущество перед таковой Cambardella and Elliott (1992), хотя и она обладает недостатком, заключающимся в относительно высокой гетерогенности фракции Остаток (ЛФ + песок + пыль), следствием чего является недооценка стабильной части ОВ.

Ранее было показано, что достаточно существенное количество стабильного ОВ (минерально-ассоциированного) сосредоточено в пылеватых фракциях, которые при полной схеме фракционирования попадают в Остаток (Артемьева, 1991; Артемьева и др., 1991; Куваева, Фрид, 2002; Титова и др., 1989; Травникова, Титова, 1978; Артемьева, Кириллова, 2017). Соответственно, включение пылеватой фракции или ее части (1–10 мкм) в состав МАОМ позволит снизить степень гетерогенности фракции Остаток и выделить стабильное ОВ практически в полном объеме. Учитывая, что в отечественном почвоведении содержание физической глины (10 мкм) является ключевым индикатором, дифференцирующим почвы по гранулометрическому составу, использование $S_{\text{физ. глина}}$ в качестве стабильной составляющей ОВ вместо $S_{\text{Ил}}$ представляется теоретически обоснованным и весьма перспективным. Следовательно, индекс $S_{\text{Ост}}/S_{\text{физ. глина}}$ может рассматриваться как более приемлемый для целей длительного мониторинга ОВ почвы по сравнению с индексом $S_{\text{Ост}}/S_{\text{Ил}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в обоих индексах $S_{\text{Ост}}/S_{\text{Ил}}$ и $S_{\text{Ост}}/S_{\text{физ. глина}}$ первоначальная идея Тейта о наличии трансформируемой и нетрансформируемой частей ОВ, а также представление о почве как о системе продуктов органо-минерального взаимодействия (Травникова, Шаймухаметов, 2000) реализуются в большей степени по сравнению с используемым в

иностранной литературе индексом $C_{\text{ПОМ}}/C_{\text{МАОМ}}$. Тем не менее, оценить валидность и надежность этого теоретического вывода возможно только при сравнительной экспериментальной апробации указанных показателей в условиях длительных полевых опытов на различных типах почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С.* Сравнительная характеристика природнослитых и уплотненных при орошении почв: Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1991. 125 с.
2. *Артемяева З.С., Алексеева Т.В., Самойлова Е.М.* Высокодисперсные фракции слитых горизонтов природнослитых и уплотненных при орошении почв // Вестник МГУ. Серия Почвоведение. 1991. № 3. С. 39–46.
3. *Артемяева З.С.* Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв: Автореф. дис ... докт. биол. наук. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2008. 48 с.
4. *Артемяева З.С., Васенев И.И., Силева Т.М.* Систематизация органо-глинистых комбинаций почв Центра Русской равнины // Вестник МГУ. 2009. № 4. С. 17–21.
5. *Артемяева З.С., Федотов Г.Н.* Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв Центра Русской равнины // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.
6. *Артемяева З.С., Кириллова Н.П.* Роль продуктов органо-минерального взаимодействия в структурообразовании и гумусообразовании основных типов почв Центра Русской равнины // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 73–95. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-73-95>.
7. *Артемяева З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Цомаева Е.В.* Изотопный состав углерода органического вещества водоустойчивых структурных отдельностей типичного чернозема в контрастных вариантах землепользования // Почвоведение. 2023. № 3. С. 339–352. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601098>.
8. *Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Флоринский М.А.* Легкоразлагаемые органические вещества почв // Химизация с/х. 1990. № 1. С. 53–55.
9. *Иванов А.Л., Когут Б.М., Семенов В.М., Тюрина Оберландер М., Ваксман Шанбахер Н.* Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90.

С. 3–38. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38>.

10. *Козут Б.М.* Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. 48 с.

11. *Козут Б.М., Травникова Л.С., Титова Н.А., Куваева Ю.В., Шевцова Л.К., Шульц Э.* Экспресс-показатель агроэкологического мониторинга гумусового состояния черноземов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2002. Вып. 56. С. 65–71.

12. *Козут Б.М.* Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. 2003. № 3. С. 308–316.

13. *Козут Б.М., Масютенко Н.П., Шульц Э., Киселева О.В., Дубовик Е.В., Сысцев С.А.* Органическое вещество агрегатов черноземов // Агроэкологическая оптимизация земледелия / Сб. докл. Межд. научно-практ. конф. Курск, 2004. С. 418–420.

14. *Козут Б.М., Сысцев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.

15. *Козут Б.М., Семенов В.М.* Конвергентная методология исследования почвенного органического вещества земель сельскохозяйственного назначения // Современные методы исследований почв и почвенного покрова / Материалы Всероссийской конференции с международным участием. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2015. С. 51–64.

16. *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>.

17. *Кононова М.М., Панкова Н.А., Бельчикова Н.П.* Изменение в содержании и составе органического вещества при окультуривании почв // Почвоведение. 1949. № 1. С. 28–37.

18. *Куваева Ю.В., Фрид А.С.* Динамика органического вещества тонкодисперсных частиц дерново-подзолистых почв в длительных опытах // Почвоведение. 2002. № 1. С. 52–64.

19. Оценка почв по содержанию и качеству гумуса для производственных моделей почвенного плодородия: (Рекомендации). М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, ВО “Агропромиздат”, 1990. 28 с.

20. Рекомендации для исследования баланса и трансформации органического вещества при сельскохозяйственном использовании и интенсивном окультуривании почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1984. 96 с.

21. *Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А. и др.* Экспериментальное определение активного органического вещества

почвы природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282–292.

22. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.

23. Тейт Р.Ш. Органическое вещество почвы. М.: Мир, 1991. 400 с.

24. Титова Н.А., Травникова Л.С., Куваева Ю.В. Состав компонентов тонкодисперсных частиц пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1989. № 6. С. 89–97.

25. Травникова Л.С., Титова Н.А. Факторы, регулирующие распределение органического вещества по фракциям < 5 мкм в почвах солонцового комплекса Калмыкии // Почвоведение. 1978. № 11. С. 121–130.

26. Травникова Л.С., Титова Н.А., Шаймухаметов М.Ш. Роль продуктов взаимодействия органической и минеральной составляющих в генезисе и плодородии почв // Почвоведение. 1992. № 10. С. 81–96.

27. Травникова Л.С., Шаймухаметов М.Ш. Продукты органо-минерального взаимодействия и устойчивость почв к деградации // В кн. “Современные проблемы почвоведения” / Науч. тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2000. С. 356–368.

28. Травникова Л.С., Артемьева З.С. Физическое фракционирование органического вещества почв с целью изучения его устойчивости к биodeградации // Экология и почвы. Изб. лек. 10-й Всеросс. школы. Т. IV. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. С. 337–346.

29. Травникова Л.С. Закономерности гумусонакопления: новые данные и их интерпретация // Почвоведение. 2002. № 7. С. 832–843.

30. Тюрин И.В. Органическое вещество почв. М: Сельхозгиз, 1937. 247 с.

31. Федотов Г.Н., Артемьева З.С. Влияние коллоидной составляющей почв на выделение грануло-денсиметрических фракций // Почвоведение. 2015. № 1. С. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010049>.

32. Шаймухаметов М.Ш., Воронина К.А. Методика фракционирования органо-глинистых комплексов почв с помощью лабораторных центрифуг // Почвоведение. 1972. № 8. С. 134–138.

33. Шаймухаметов М.Ш., Травникова Л.С. Способ извлечения из почвы поглощающего комплекса // Авт. свид. № 1185238. Госком СССР по делам изобретений и открытий. Заявка № 3732977. Приоритет изобр. 30.03.1984.

34. Adair E.C., Parton W.J., del Grosso S.J., Silver W.L., Harmon M.E., Hall S.A., Burke I.C., Hart S.C. Simple three pool kinetic model describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates // Glob. Change Biol. 2008. Vol. 14. P. 2636–2660. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01674.x>.

35. *Andren O., Paustian K.* Barley straw decomposition in the field: a comparison of models // *Ecology*. 1987. Vol. 68. P. 1190–1200. DOI: <https://doi.org/10.2307/1939203>.
36. *Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W.* Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. No. 2967. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5>.
37. *Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G.J., Simpson M.J.* Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 2021. Vol. 156 P. 108189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.
38. *Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B.* Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants // *Catena*. 2021. Vol. 204. P. 105403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105403>.
39. *Artemyeva Z.S., Kogut B.M.* The effect of tillage on organic carbon stabilization in microaggregates in different climatic zones of European Russia // *Agriculture*. 2016. Vol. 6(4). P. 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture6040063>.
40. *Baisden W.T., Amundson R., Cook A.C., Brenner D.L.* The turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soil // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2002. Vol. 16. P. 1117–1132. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GB001822>.
41. *Balabane M., Plante A.* Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques // *Eur. J. Soil Sci.* 2004. Vol. 55. P. 415–127. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1351-0754.2004.0608.x>.
42. *Balesdent J., Chenu C., Balabane M.* Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage // *Soil Till. Res.* 2000. Vol. 53 (3–4). P. 215–230. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5).
43. *Beare M.H., McNeill S.J., Curtin D. et al.* Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study // *Biogeochem.* 2014. Vol. 120. P. 71–87. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1>.
44. *Bol R., Poirier N., Balesdent J., Gleixner G.* Molecular turnover time of soil organic matter in particle-size fractions of an arable soil // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2009. Vol. 23. P. 2551–2558. DOI: <https://doi.org/10.1002/rcm.4124>.
45. *Cambardella C.A., Elliott E.T.* Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. Vol. 56(3). P. 777–783. DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1992.03615995005600030017X>.

46. *Carter M.R.* Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions // *Agron. J.* 2002. Vol. 94. P. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3800>.
47. *Chenu C., Plante A.F.* Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the ‘primary organo-mineral complex’ // *Eur. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 596–607. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00834.x>.
48. *Christensen B.T.* Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover // *Eur. J. Soil Sci.* 2001. Vol. 52. P. 345–353. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>.
49. *Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. P. 989–994. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.
50. *Delahaie A.A., Barré P., Baudin F. et al.* Elemental stoichiometry and Rock-Eval® thermal stability of organic matter in French topsoils // *SOIL*. 2023. Vol. 9. P. 209–229. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-9-209-2023>.
51. *Delahaie A.A., Cécillon L., Stojanova M. et al.* Investigating the complementarity of thermal and physical soil organic carbon fractions // *SOIL* 2024. Vol. 10. P. 795–812. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-795-2024>.
52. *Dobarco M.R., Wadoux A.M.J.-C., Malone B. et al.* Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty // *Biogeosci.* 2023. Vol. 20. P. 1559–1586. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023>.
53. *Dupla X., Gondret K., Sauzet O. et al.* Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study // *Geoderma*. 2021. Vol. 400. P. 115125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115125>.
54. *Gerzabek M.H., Haberhauer G., Kirchmann H.* Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2001. Vol. 65. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2001.652352X>.
55. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid-state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy // *Austral. J. Soil Res.* 1994. Vol. 32. P. 285–309. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9940285>.
56. *Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M., Ellert B.H.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils // *Can. J. Soil Sci.* 1994. Vol. 74. P. 367–385. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss94-051>.
57. *Guillaume T., Makowski D., Libohova Z. et al.* Soil organic carbon

- saturation in cropland-grassland systems: Storage potential and soil quality // *Geoderma*. 2022. Vol. 406. P. 115529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115529>.
58. Heckman K., Throckmorton H., Horwath W.R., Swanston C.W., Rasmussen C. Variation in the Molecular Structure and Radiocarbon Abundance of Mineral-Associated Organic Matter across a Lithosequence of Forest Soils // *Soil Syst.* 2018. Vol. 2. P. 36. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020036>.
59. Hurisso T.T., Davis J.G., Brummer J. *et al.* Rapid changes in microbial biomass and aggregate size distribution in response to changes in organic matter management in grass pasture // *Geoderma*. 2013. Vol. 193. P. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.016>.
60. Jastrow J.D., Boutton T.W., Miller R.M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1996. Vol. 60. P. 801–807. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030017x>.
61. Jastrow J.D., Miller R.M., Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie // *Soil Biol. Biochem.* 1998. Vol. 30(7). P. 905–916. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00207-1).
62. Jenkinson D.S., Coleman K. Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon // *Eur. J. Soil Sci.* 1994. Vol. 45. P. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00498.x>.
63. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma*. 2005. Vol. 128. P. 63–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>.
64. Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S. Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management // *Understanding and fostering soil carbon sequestration*. Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022. P. 1–36. DOI: <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02>.
65. Kölbl A., Leifeld J., Kögel-Knabner I. A comparison of two methods for the isolation of free and occluded particulate organic matter // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2005. Vol. 168. P. 660–667. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521805>.
66. Kumar R., Rawat K. S., Singh J. *et al.* Soil aggregation dynamics and carbon sequestration // *J. App. Nat. Sci.* 2013. Vol. 5(1). P. 250–267. DOI: <https://doi.org/10.31018/jans.v5i1.314>.
67. Laird D.A., Martens D.A., Kingery W.L. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil. I. Chemical, biochemical, and spectroscopic analyses //

- Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. Vol. 65. P. 1413–1418. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551413x>.
68. *Laub M., Blagodatsky S., Van de Broek M. et al.* SAMM version 1.0: a numerical model for microbial-mediated soil aggregate formation // *Geosci. Model Dev.* 2024. Vol. 17. P. 931–956. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-17-931-2024>.
69. *Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F.* Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Glob. Ch. Biol.* 2020. Vol. 26(1). P. 261–273. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.
70. *Mueller C.W., Kögel-Knabner I.* Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites // *Biol. Fertil. Soils.* 2009. Vol. 45. P. 347–359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0336-9>.
71. *Olchin G.P., Ogle S., Frey S.D. et al.* Residue Carbon Stabilization in Soil Aggregates of No-Till and Tillage Management of Dryland Cropping Systems // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2008. Vol. 72. P. 507–513. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0417>.
72. *Parton W.J.* The CENTURY model // In: *Powlson D.S., Smith P., Smith J.U.* (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets*. NATO ASI Series I. Springer-Verlag, Heidelberg, 1996. P. 283–293. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_23.
73. *Pinheiro Junior C.R., Canisares L.P., Abreu M.C. et al.* Drivers of carbon stabilization and sequestration in Brazil's black soils // *Catena.* 2024. Vol. 246. P. 108451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108451>.
74. *Plante A.F., Conant R.T., Paul E.A. et al.* Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter // *Eur. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 456–467. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00792.x>.
75. *Poeplau C., Don A., Six J. et al.* Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // *Soil Biol. Biochem.* 2018. Vol. 125. P. 10–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>.
76. *Poeplau C., Don A.* A simple soil organic carbon level metric beyond the organic carbon-to-clay ratio // *Soil Use Manag.* 2023. Vol. 39. P. 1057–1067. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12921>.
77. *Prout J.M., Shepherd K.D., McGrath S.P. et al.* What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio // *Eur. J. Soil Sci.* 2021. Vol. 72. P. 2493–2503. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13012>.
78. *Prout J.M., Shepherd K.D., McGrath S.P. et al.* Changes in organic carbon

to clay ratios in different soils and land uses in England and Wales over time // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 5162. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09101-3>.

79. *Pulley S., Taylor H., Prout J.M. et al.* The soil organic carbon:clay ratio in North Devon, UK: implications for marketing soil carbon as an asset class // Soil Use Manag. 2023. Vol. 39. P. 1068–1081. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12920>.

80. *Rabot E., Saby N.P.A., Martin M.P. et al.* Relevance of the organic carbon to clay ratio as a national soil health indicator // Geoderma. 2024. Vol. 443. P. 116829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116829>.

81. *Roscoe R., Buurman P., Velthorst E.J.* Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and $\delta^{13}\text{C}$ distribution in particle-size fractions // Eur. J. Soil Sci. 2000. Vol. 51. P. 445–454. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00321.x>.

82. *Schiedung M., Barré P., Poeplau C.* Separating fast from slow cycling soil organic carbon – A multi-method comparison on land use change sites // Geoderma. 2025. Vol. 453. P. 117154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117154>.

83. *Schlüter S. et al.* Microscale carbon distribution around pores and particulate organic matter varies with soil moisture regime // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. P. 2098. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29605-w>.

84. *Shang C., Tiessen H.* Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils: Size, density, and magnetic separations // Soil Sci. Soc. Am. J. 1998. Vol. 62. P. 1247–1257. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050015x>.

85. *Silver W.L., Miya R.K.* Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects // Oecologia. 2001. Vol. 129. P. 407–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100740>.

86. *Six J., Elliott E.T., Paustian K., Doran J.W.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1998. Vol. 62. P. 1367–1377. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x>.

87. *Six J., Elliott E.T., Paustian K.* Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-till systems // Soil Sci. Soc. Am. J. 1999. Vol. 63. P. 1350–1358. DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1999.6351350X>.

88. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian J.* Stabilisation mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // Plant Soil. 2002. Vol. 241. P. 155–176. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

89. *Skadell L.E., Schneider Fl., Gocke M.I. et al.* Twenty percent of

- agricultural management effects on organic carbon stocks occur in subsoils – Results of ten long-term experiments // *Agr. Ecosys. Environ.* 2023. Vol. 356. P. 108619. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4354778>.
90. Skjemstad J.O., Janik L.J., Head M.J., McClure S.G. High-energy ultraviolet photooxidation: a novel technique for studying physically protected organic-matter in clay-sized and siltsized aggregates // *J. Soil Sci.* 1993. Vol. 44. P. 485–499. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x>.
91. Solomon D., Lehmann J., Zech W. Land use effects on soil organic matter properties of Chromic Luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2000. Vol. 78. P. 203–213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00126-7).
92. Trumbore S.E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change // *Proc. Natl. Acad. Sci U.S.A.* 1997. Vol. 94. P. 8284–8291. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8284>.
93. Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2009. Vol. 37. P. 47–66. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124300>.
94. Vidal A. et al. Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms // *Soil Biol. Biochem.* 2021. Vol. 160. P. 108347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108347>.
95. Virto I., Barré P., Chenu C. Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale // *Geoderma*. 2008. Vol. 146. P. 326–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.021>.
96. Virto I., Moni C., Swanston C., Chenu C. Turnover of intra- and extra-aggregate organic matter at the silt-size scale // *Geoderma*. 2010. Vol. 156. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.028>.
97. Von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K. et al. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms // *Soil Biol. Biochem.* 2007. Vol. 39. P. 2183–2207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>.
98. Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I. et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. No. 4115. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>.
99. Yamashita T., Flessa H., John B. et al. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use // *Soil Biol. Biochem.* 2006. Vol. 38. P. 3222–3234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.013>.
100. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J. Where and why do

particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? // Soil Biol. Biochem. 2022. Vol. 172. Art. No. 108756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>.
101. Zimmermann M., Leifeld J., Schmidt M.W.I. et al. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model // Eur. J. Soil Sci. 2007. Vol. 58. P. 658–667. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x>.

REFERENCES

1. Artemyeva Z.S., *Sravnitel'naya kharakteristika prirodnoslitykh i uplotnennykh pri oroshenii pochv: Dis. ... kand. biol. nauk* (Comparative characteristics of naturally compacted and irrigated soils, Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow: Lomonosov Moscow State University, 1991, 125 p.
2. Artemyeva Z.S., Alekseeva T.V., Samoilova E.M., Vysokodispersnyye fraktsii slitykh gorizontov prirodnoslitykh i uplotnennykh pri oroshenii pochv (Highly dispersed fractions of continuous horizons of naturally compacted and irrigated soils), *Vestnik MGU, Seriya Pochvovedeniye*, 1991, No. 3, pp. 39–46.
3. Artemyeva Z.S., *Organicheskiye i organo-glinistyie komplekсы agrogenno-degradirovannykh pochv: Avtoref. dis ... dokt. biol. nauk* (Organic and organo-clayey complexes of agrogenic-degraded soils, Extended abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2008, 48 p.
4. Artemyeva Z.S., Vasenev I.I., Sileva T.M., Sistematizatsiya organo-glinistyykh kombinatsiy pochv Tsentra Russkoy ravniny (Systematization of organo-clay combinations of soils of the Central Russian Plain), *Vestnik MGU*, 2009, No. 4, pp. 17–21.
5. Artemyeva Z.S., Fedotov G.N., Sostav funktsional'nykh pulov legkorazlagayemogo organicheskogo veshchestva avtomorfnykh zonal'nogo ryada pochv Tsentra Russkoy ravniny (Composition of functional pools of easily decomposed organic matter of automorphic zonal soils of the Central Russian Plain), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17: Pochvovedeniye*, 2013, No. 4, pp. 3–10.
6. Artemyeva Z.S., Kirillova N.P., The role of organic and mineralogical interaction products in the structure forming and humus forming of the basic types of soils in the Center of Russian Plain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp. 73–95, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-73-95>.
7. Artemyeva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Izotopnyy sostav ugleroda organicheskogo veshchestva vodoustoychivyykh strukturnykh otdel'nostey tipichnogo chernozema v kontrastnykh variantakh zemlepol'zovaniya (Isotopic composition of carbon in organic matter of water-

stable structural units of typical chernozem in contrasting land use options), *Pochvovedeniye*, 2023, No. 3, pp. 339–352, DOI:

<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601098>.

8. Ganzhara N.F., Borisov B.A., Florinsky M.A., Legkorazlagayemyye organicheskiye veshchestva pochv (Easily decomposed organic matter of soils), *Khimizatsiya s/kh.*, 1990, No. 1, pp. 53–55.

9. Ivanov A.L., Kogut B.M., Semenov V.M., Turina Oberlander M., Waksman Schanbacher N., The development of theory on humus and soil organic matter: from Turin and Waksman to Present Days, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp. 3–38, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38>.

10. Kogut B.M., *Transformatsiya gumusovogo sostoyaniya chernozemov pri ikh sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii: Avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk* (Transformation of the humus state of chernozems during their agricultural use, Extended abstract of Dr. agric. sci. thesis), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1996. 48 p.

11. Kogut B.M., Travnikova L.S., Titova N.A., Kuvaeva Yu.V., Shevtsova L.K., Schultz E., Express indicator of agroecological monitoring of the humus state of chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2002, Vol. 56, pp. 65–71.

12. Kogut B.M., Printsipy i metody otsenki soderzhaniya transformiruyemogo organicheskogo veshchestva v pakhotnykh pochvakh (Principles and methods for assessing the content of transformable organic matter in arable soils), *Pochvovedeniye*, 2003, No. 3, pp. 308–316.

13. Kogut B.M., Masyutenko N.P., Shultz E., Kiseleva O.V., Dubovik E.V., Sysuev S.A., Organicheskoye veshchestvo agregatov chernozemov (Organic matter of chernozem aggregates), *Agroekologicheskaya optimizatsiya zemledeliya* (Agroecological optimization of agriculture), Proc. Sci. Pract. Conf., Kursk, 2004, pp. 418–420.

14. Kogut B.M., Sysuev S.A., Kholodov V.A., Vodoprochnost' i labil'nyye gumusovyye veshchestva tipichnogo chernozema pri raznom zemlepol'zovanii (Water stability and labile humus substances of typical chernozem under different land use), *Pochvovedeniye*, 2012, No. 5, pp. 555–561.

15. Kogut B.M., Semenov V.M., Konvergentnaya metodologiya issledovaniya pochvennogo organicheskogo veshchestva zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya (Convergent methodology for studying soil organic matter of agricultural lands), *Sovremennyye metody issledovaniy pochv i pochvennogo pokrova* (Modern methods of soil and soil cover research), Proc. of the All-Russian Conf. with international participation, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2015, pp. 51–64.

16. Kogut B.M., Semenov V.M., Artemyeva Z.S., Danchenko N.N., Degumusirovaniye i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda (Dehumusification

and soil carbon sequestration), *Agrokhimiya*, 2021, No. 5, pp. 3–13, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>.

17. Kononova M.M., Pankova N.A., Belchikova N.P., *Izmeneniye v sodержanii i sostave organicheskogo veshchestva pri okul'turivanii pochv* (Changes in the content and composition of organic matter during soil cultivation), *Pochvovedeniye*, 1949, No. 1, pp. 28–37.

18. Kuvaeva Yu.V., Frid A.S., *Dinamika organicheskogo veshchestva tonkodispersnykh chastits dernovo-podzolistykh pochv v dlitel'nykh opytakh* (Dynamics of organic matter of fine particles of sod-podzolic soils in long-term experiments), *Pochvovedeniye*, 2002, No. 1, pp. 52–64.

19. Assessment of soils by humus content and quality for production models of soil fertility: (Recommendations), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, VO “Agropromizdat”, 1990, 28 p.

20. Recommendations for studying the balance and transformation of organic matter during agricultural use and intensive soil cultivation, Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1984, 96 p.

21. Semenov V.M., Kravchenko I.K., Ivannikova L.A. et al., *Eksperimental'noye opredeleniye aktivnogo organicheskogo veshchestva pochvy prirodnykh i sel'skokhozyaystvennykh ekosistem* (Experimental determination of active organic matter of the soil of natural and agricultural ecosystems), *Pochvovedeniye*, 2006, No. 3, pp. 282–292.

22. Semenov V.M., Kogut B.M., *Pochvennoye organicheskoye veshchestvo* (Soil organic matter), Moscow: GEOS, 2015, 233 p.

23. Tate R., *Organicheskoye veshchestvo pochvy* (Soil organic matter), Moscow: Mir, 1991, 400 p.

24. Titova N.A., Travnikova L.S., Kuvaeva Yu.V., *Sostav komponentov tonkodispersnykh chastits pakhotnoy dernovo-podzolistoy pochvy* (Composition of the components of finely dispersed particles of arable sod-podzolic soil), *Pochvovedeniye*, 1989, No. 6, pp. 89–97.

25. Travnikova L.S., Titova N.A., *Faktory, reguliruyushchiye raspredeleniye organicheskogo veshchestva po fraktsiyam < 5 mkm v pochvakh solontsovogo kompleksa Kalmykii* (Factors regulating the distribution of organic matter by fractions < 5 μ m in the soils of the solonetz complex of Kalmykia), *Pochvovedeniye*, 1978, No. 11, pp. 121–130.

26. Travnikova L.S., Titova N.A., Shaimukhametov M.Sh., *Rol' produktov vzaimodeystviya organicheskoy i mineral'noy sostavlyayushchikh v genezise i plodorodii pochv* (The role of products of interaction of organic and mineral components in the genesis and fertility of soils), *Pochvovedeniye*, 1992, No. 10, pp. 81–96.

27. Travnikova L.S., Shaimukhametov M.Sh., *Produkty organo-mineral'nogo vzaimodeystviya i ustoychivost' pochv k degradatsii* (Products of organo-

- mineral interaction and soil resistance to degradation), In: *Modern Problems of Soil Science* (Sovremennyye problemy pochvovedeniya), Research Works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 2000, pp. 356–368.
28. Travnikova L.S., Artemyeva Z.S., Fizicheskoye fraktsionirovaniye organicheskogo veshchestva pochv s tsel'yu izucheniya yego ustoichivosti k biodegradatsii (Physical fractionation of soil organic matter in order to study its resistance to biodegradation), *Ekologiya i pochvy* (Ecology and Soils), Abstract of the 10th All-Russian School, Vol. IV, Pushchino: ONTI PSC RAS, 2001, pp. 337–346.
29. Travnikova L.S., Zakonomernosti gumusonakopleniya: novyye dannyye i ikh interpretatsiya (Regularities of humus accumulation: new data and their interpretation), *Pochvovedeniye*, 2002, No. 7, pp. 832–843.
30. Tyurin I.V., *Organicheskoye veshchestvo pochv* (Organic matter of soils), Moscow: Selkhozgiz, 1937, 247 p.
31. Fedotov G.N., Artem'yeva Z.S., Vliyaniye kolloidnoy sostavlyayushchey pochv na vydeleniye granulo-densimetricheskikh fraktsiy (Influence of the colloidal component of soils on the allocation of granulo-densimetric fractions), *Pochvovedeniye*, 2015, No. 1, pp. 61–70, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010049>.
32. Shaimukhametov M.Sh., Voronina K.A., Metodika fraktsionirovaniya organo-glinistyykh kompleksov pochv s pomoshch'yu laboratornykh tsentrifug (Method of fractionating organoclay complexes of soils using laboratory centrifuges), *Pochvovedeniye*, 1972, No. 8, pp. 134–138.
33. Shaimukhametov M.Sh., Travnikova L.S., Method of extracting an absorbing complex from soil, Author's certificate No. 1185238, USSR State Committee for Inventions and Discoveries, Application No. 3732977, Priority of invention 30.03.1984.
34. Adair E.C., Parton W.J., del Grosso S.J., Silver W.L., Harmon M.E., Hall S.A., Burke I.C., Hart S.C., Simple three pool kinetic model describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates, *Glob. Change Biol.*, 2008, Vol. 14, pp. 2636–2660, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01674.x>.
35. Andren O., Paustian K., Barley straw decomposition in the field: a comparison of models, *Ecology*, 1987, Vol. 68, pp. 1190–1200, DOI: <https://doi.org/10.2307/1939203>.
36. Angst G., Mueller K.E., Castellano M.J., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C.W., Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key, *Nature Communications*, 2023, Vol. 14, Art. No. 2967, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5>.
37. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G.J., Simpson M.J., Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic

- matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2021, Vol. 156, pp. 108189, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.
38. Artemyeva Z., Danchenko N., Kolyagin Yu., Kirillova N., Kogut B., Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants, *Catena*, 2021, Vol. 204, pp. 105403, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105403>.
39. Artemyeva Z.S., Kogut B.M., The effect of tillage on organic carbon stabilization in microaggregates in different climatic zones of European Russia, *Agriculture*, 2016, Vol. 6(4), pp. 63, DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture6040063>.
40. Baisden W.T., Amundson R., Cook A.C., Brenner D.L., The turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soil, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2002, Vol. 16, pp. 1117–1132, DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GB001822>.
41. Balabane M., Plante A., Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques, *Eur. J. Soil Sci.*, 2004, Vol. 55, pp. 415–127, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1351-0754.2004.0608.x>.
42. Balesdent J., Chenu C., Balabane M., Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage, *Soil Till. Res.*, 2000, Vol. 53(3–4), pp. 215–230, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5).
43. Beare M.H., McNeill S.J., Curtin D. et al., Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study, *Biogeochem*, 2014, Vol. 120, pp. 71–87, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1>.
44. Bol R., Poirier N., Balesdent J., Gleixner G., Molecular turnover time of soil organic matter in particle-size fractions of an arable soil, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 2009, Vol. 23, pp. 2551–2558, DOI: <https://doi.org/10.1002/rcm.4124>.
45. Cambardella C.A., Elliott E.T., Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, Vol. 56(3), pp. 777–783, DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1992.03615995005600030017X>.
46. Carter M.R., Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions, *Agron. J.*, 2002, Vol. 94, pp. 38–47, DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3800>.
47. Chenu C., Plante A.F., Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the ‘primary organo-mineral complex’, *Eur. J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 596–607, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00834.x>.
48. Christensen B.T., Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover, *Eur. J. Soil Sci.*, 2001,

Vol. 52, pp. 345–353, DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>.

49. Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E., Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter, *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 989–994, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

50. Delahaie A.A., Barré P., Baudin F. et al., Elemental stoichiometry and Rock-Eval® thermal stability of organic matter in French topsoils, *SOIL*, 2023, Vol. 9, pp. 209–229, DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-9-209-2023>.

51. Delahaie A.A., Cécillon L., Stojanova M. et al., Investigating the complementarity of thermal and physical soil organic carbon fractions, *SOIL*, 2024, Vol. 10, pp. 795–812, DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-795-2024>.

52. Dobarco M.R., Wadoux A.M.J.-C., Malone B. et al., Mapping soil organic carbon fractions for Australia, their stocks, and uncertainty, *Biogeosci.*, 2023, Vol. 20, pp. 1559–1586, DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-20-1559-2023>.

53. Dupla X., Gondret K., Sauzet O. et al., Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study, *Geoderma*, 2021, Vol. 400, pp. 115125, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115125>.

54. Gerzabek M.H., Haberhauer G., Kirchmann H., Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, Vol. 65, pp. 352–358, DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2001.652352X>.

55. Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid-state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy, *Austral. J. Soil Res.*, 1994, Vol. 32, pp. 285–309, DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9940285>.

56. Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M., Ellert B.H., Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils, *Can. J. Soil Sci.*, 1994, Vol. 74, pp. 367–385, DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss94-051>.

57. Guillaume T., Makowski D., Libohova Z. et al., Soil organic carbon saturation in cropland-grassland systems: Storage potential and soil quality, *Geoderma*, 2022, Vol. 406, pp. 115529, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115529>.

58. Heckman K., Throckmorton H., Horwath W.R., Swanston C.W., Rasmussen C., Variation in the Molecular Structure and Radiocarbon Abundance of Mineral-Associated Organic Matter across a Lithosequence of Forest Soils, *Soil Syst.*, 2018, Vol. 2, pp. 36, DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020036>.

59. Hurisso T.T., Davis J.G., Brummer J. et al., Rapid changes in microbial biomass and aggregate size distribution in response to changes in organic matter management in grass pasture, *Geoderma*, 2013, Vol. 193, pp. 68–75, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.016>.
60. Jastrow J.D., Boutton T.W., Miller R.M., Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, Vol. 60, pp. 801–807, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030017x>.
61. Jastrow J.D., Miller R.M., Lussenhop J., Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie, *Soil Biol. Biochem.*, 1998, Vol. 30(7), pp. 905–916, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00207-1).
62. Jenkinson D.S., Coleman K., Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon, *Eur. J. Soil Sci.*, 1994, Vol. 45, pp. 167–174, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00498.x>.
63. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H., Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use, *Geoderma*, 2005, Vol. 128, pp. 63–79, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>.
64. Kögel-Knabner I., Wiesmeier M., Mayer S., Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management, In: *Understanding and fostering soil carbon sequestration*, Cambridge: Burleigh Dodds Sci. Publ. Lim., 2022, pp. 1–36, DOI: <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0106.02>.
65. Kölbl A., Leifeld J., Kögel-Knabner I., A comparison of two methods for the isolation of free and occluded particulate organic matter, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2005, Vol. 168, pp. 660–667, DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521805>.
66. Kumar R., Rawat K. S., Singh J. et al., Soil aggregation dynamics and carbon sequestration, *J. App. Nat. Sci.*, 2013, Vol. 5(1), pp. 250–267, DOI: <https://doi.org/10.31018/jans.v5i1.314>.
67. Laird D.A., Martens D.A., Kingery W.L., Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil. I. Chemical, biochemical, and spectroscopic analyses, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, Vol. 65, pp. 1413–1418, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551413x>.
68. Laub M., Blagodatsky S., Van de Broek M. et al., SAMM version 1.0: a numerical model for microbial-mediated soil aggregate formation, *Geosci. Model Dev.*, 2024, Vol. 17, pp. 931–956, DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-17-931-2024>.
69. Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F., Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change

in the 21st century, *Glob. Ch. Biol.*, 2020, Vol. 26(1), pp. 261–273, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

70. Mueller C.W., Köegel-Knabner I., Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites, *Biol. Fertil. Soils.*, 2009, Vol. 45, pp. 347–359, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0336-9>.

71. Olchin G.P., Ogle S., Frey S.D. et al., Residue Carbon Stabilization in Soil Aggregates of No-Till and Tillage Management of Dryland Cropping Systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2008, Vol. 72, pp. 507–513, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0417>.

72. Parton W.J. The CENTURY model, In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets*, NATO ASI Series I, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996, pp. 283–293, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_23.

73. Pinheiro Junior C.R., Canisares L.P., Abreu M.C. et al., Drivers of carbon stabilization and sequestration in Brazil's black soils, *Catena*, 2024, Vol. 246, pp. 108451, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108451>.

74. Plante A.F., Conant R.T., Paul E.A. et al., Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter, *Eur. J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 456–467, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00792.x>.

75. Poeplau C., Don A., Six J. et al., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biol. Biochem.*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>.

76. Poeplau C., Don A., A simple soil organic carbon level metric beyond the organic carbon-to-clay ratio, *Soil Use Manag.*, 2023, Vol. 39, pp. 1057–1067, DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12921>.

77. Prout J.M., Shepherd K.D., McGrath S.P. et al., What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio, *Eur. J. Soil Sci.*, 2021, Vol. 72, pp. 2493–2503, DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13012>.

78. Prout J.M., Shepherd K.D., McGrath S.P. et al., Changes in organic carbon to clay ratios in different soils and land uses in England and Wales over time, *Sci. Rep.*, 2022, Vol. 12, pp. 5162, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09101-3>.

79. Pulley S., Taylor H., Prout J.M. et al., The soil organic carbon:clay ratio in North Devon, UK: implications for marketing soil carbon as an asset class, *Soil Use Manag.*, 2023, Vol. 39, pp. 1068–1081, DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12920>.

80. Rabot E., Saby N.P.A., Martin M.P. et al., Relevance of the organic carbon

to clay ratio as a national soil health indicator, *Geoderma*, 2024, Vol. 443, pp. 116829, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116829>.

81. Roscoe R., Buurman P., Velthorst E.J., Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and $\delta^{13}\text{C}$ distribution in particle-size fractions, *Eur. J. Soil Sci.*, 2000, Vol. 51, pp. 445–454, DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00321.x>.

82. Schiedung M., Barré P., Poeplau C., Separating fast from slow cycling soil organic carbon – A multi-method comparison on land use change sites, *Geoderma*, 2025, Vol. 453, pp. 117154, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117154>.

83. Schlüter S. et al., Microscale carbon distribution around pores and particulate organic matter varies with soil moisture regime, *Nat. Commun.*, 2022, Vol. 13, pp. 2098, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29605-w>.

84. Shang C., Tiessen H., Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils: Size, density, and magnetic separations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, Vol. 62, pp. 1247–1257, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050015x>.

85. Silver W.L., Miya R.K., Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects, *Oecologia*, 2001, Vol. 129, pp. 407–419, DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100740>.

86. Six J., Elliott E.T., Paustian K., Doran J.W., Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, Vol. 62, pp. 1367–1377, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x>.

87. Six J., Elliott E.T., Paustian K., Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-till systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, Vol. 63, pp. 1350–1358, DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1999.6351350X>.

88. Six J., Connant R.T., Paul E.A., Paustian J., Stabilisation mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils, *Plant Soil*, 2002, Vol. 241, pp. 155–176, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

89. Skadell L.E., Schneider F.I., Gocke M.I. et al., Twenty percent of agricultural management effects on organic carbon stocks occur in subsoils – Results of ten long-term experiments, *Agr. Ecosys. Environ.*, 2023, Vol. 356, pp. 108619, DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4354778>.

90. Skjemstad J.O., Janik L.J., Head M.J., McClure S.G., High-energy ultraviolet photooxidation: a novel technique for studying physically protected organic-matter in clay-sized and siltsized aggregates, *J. Soil Sci.*, 1993, Vol. 44, pp. 485–499, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x>.

91. Solomon D., Lehmann J., Zech W., Land use effects on soil organic matter

- properties of Chromic Luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2000, Vol. 78, pp. 203–213, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00126-7).
92. Trumbore S.E., Potential responses of soil organic carbon to global environmental change, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 1997, Vol. 94, pp. 8284–8291, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8284>.
93. Trumbore S., Radiocarbon and soil carbon dynamics, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2009, Vol. 37, pp. 47–66, DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124300>.
94. Vidal A. et al., Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms, *Soil Biol. Biochem.*, 2021, Vol. 160, pp. 108347, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108347>.
95. Virto I., Barré P., Chenu C., Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale, *Geoderma*, 2008, Vol. 146, pp. 326–335, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.021>.
96. Virto I., Moni C., Swanston C., Chenu C., Turnover of intra- and extra-aggregate organic matter at the silt-size scale, *Geoderma*, 2010, Vol. 156, pp. 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.028>.
97. Von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K. et al., SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biol. Biochem.*, 2007, Vol. 39, pp. 2183–2207, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>.
98. Witzgall K., Vidal A., Schubert D.I. et al., Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon, *Nature Communications*, 2021, Vol. 12, Art. No. 4115, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>.
99. Yamashita T., Flessa H., John B. et al., Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use, *Soil Biol. Biochem.*, 2006, Vol. 38, pp. 3222–3234, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.013>.
100. Yu W., Huang W., Weintraub-Leff S.R., Hall S.J., Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biol. Biochem.*, 2022, Vol. 172, Art. No. 108756, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>.
101. Zimmermann M., Leifeld J., Schmidt M.W.I. et al., Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model, *Eur. J. Soil Sci.*, 2007, Vol. 58, pp. 658–667, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x>.