

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-122-133



Ссылки для цитирования:

Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Данченко Н.Н., Ильин Б.С., Лазарев В.И. Водоекстрагируемый и микробный углерод черноземов разного вида использования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 122-133. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-122-133

Cite this article as:

Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Danchenko N.N., Ilyin B.S., Lazarev V.I., Dissolved organic matter and microbial carbon of Protocalcic Chernozems of different land management, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 112, pp. 122-133, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-122-133

Водоекстрагируемый и микробный углерод черноземов разного вида использования

© 2022 г. В. А. Холодов^{1*}, Ю. Р. Фарходов¹, Н. В. Ярославцева¹,
Н. Н. Данченко¹, Б. С. Ильин², В. И. Лазарев²

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

* <https://orcid.org/0000-0002-6896-7897>, e-mail: vkholod@mail.ru.

²ФГБНУ “Курский федеральный аграрный научный центр”, Россия,
305526, Курская область, Курский район, п. Черемушки, 10.

Поступила в редакцию 22.08.2022, после доработки 17.10.2022,
принята к публикации 08.11.2022

Резюме: Водоекстрагируемое органическое вещество – это наиболее активная и подвижная составляющая углерода почвы. Другой активной фракцией и чрезвычайно биологической является углерод, входящий в состав микроорганизмов. Обе эти фракции играют существенную роль как в агроценозах, так и в глобальном цикле углерода на нашей планете. Целью работы было оценить содержание углерода в водоекстрагируемом органическом веществе, а также углерода микробного происхождения в типичных черноземах разного вида использования. Были исследованы образцы типичных черноземов, отобранные на полях многолетних опытов с различными видами землепользования: бессменный черный пар

в течение 55 лет (с 1964 г.); традиционная обработка – четырехпольный севооборот, первая ротация; прямой посев – аналогичный прямому посеву плодосмен, первая ротация; 21-летняя залежь (с 1998 г.) после 34 лет черного парования (с 1964 г.). Определили содержание углерода водоэкстрагируемого органического вещества и содержание углерода микробного происхождения. В рассматриваемом ряду изученных вариантов доля углерода водоэкстрагируемого органического вещества от общего содержания органического вещества в верхнем горизонте (0–15 см) составила 0.69, 0.85, 1.01 и 0.98% соответственно, а углерода микробного происхождения – 0.27, 0.55, 0.53 и 1.52%. Отмечено, что на фоне увеличения содержания общего органического углерода при прямом посеве, по сравнению с традиционной обработкой, микробная биомасса в этом варианте не увеличивается. Для варианта залежь, в отличие от всех остальных видов землепользования, характерна большая доля микробного углерода, по сравнению с углеродом водоэкстрагируемого органического вещества.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество, микробный углерод, Protocalcic Chernozems, водоэкстрагируемое органическое вещество, фумигирование, лизис.

Dissolved organic matter and microbial carbon of Protocalcic Chernozems of different land management

© 2022 V. A. Kholodov^{1*}, Yu. R. Farkhodov¹, N. V. Yaroslavtseva¹, N. H. Danchenko¹, B. S. Piyin², V. I. Lazarev²

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-6896-7897>, e-mail: vkholod@mail.ru.

²*FGBNU “Kursk Federal Agrarian Research Center”,
10 Cheremushki village, Kursk region 305526, Russian Federation.*

Received 22.08.2022, Revised 17.10.2022, Accepted 08.11.2022

Abstract: Water-extractable organic matter is the most active and mobile form of soil carbon. The other active fraction and extremely biolabile is the carbon constituent of microorganisms. Both of these fractions play an essential role in agrocenoses and in the global carbon cycle on our planet. The aim of the work was to estimate the carbon content of water-extractable organic matter as well as that of microbial origin in typical chernozems (Protocalcic Chernozems) of

different land-use types. Protocalcic Chernozem samples taken from the fields of long-term experiments with different types of land use were investigated: a permanent bare fallow for 55 years (since 1964); conventional tillage – four-field crop rotation, first rotation; direct seeding – crop rotation similar to direct seeding, first rotation; a 21-year fallow (since 1998) after 34 years of bare fallow (since 1964). We determined the carbon content of water-extractable organic matter and the carbon content of microbial origin. In the studied series of variants, the proportion of carbon of water-extractable organic matter in the total amount of organic matter in the upper horizon (0–15 cm) was 0.69, 0.85, 1.01, and 0.98%, respectively, while that of carbon of microbial origin was 0.27, 0.55, 0.53, and 1.52%. It was noted that against the background of increasing the content of total organic carbon in direct seeding variant, compared with the traditional soil treatment, the microbial biomass in this variant does not increase. The fallow variant, unlike all other types of land use, is characterized by a higher proportion of microbial carbon, in contrast to the carbon of water-extractable organic matter.

Keywords: dissolved organic matter, microbial carbon, Protocalcic Chernozems, water-extractable organic matter, fumigation, lysis.

ВВЕДЕНИЕ

Растворенное органическое вещество (РОВ) – важная составляющая почвенного органического вещества (ОВ). Это наиболее подвижная, активная и, видимо, доступная для микроорганизмов часть ОВ ([Дьяконова, 1967](#); [Дьяконова, Булеева 1987](#); [Когут, 1996](#); [Караванова, 2013](#); [Bengtsson et al., 2018](#); [Chantigny, 2003](#); [Gmach et al., 2020](#); [Rodrigues et al., 2016](#)). Для его изучения обычно применяют процедуру экстракции ([Дьяконова, Булеева 1987](#); [Караванова, 2013](#); [Холодов и др., 2020](#)), поэтому ОВ в полученных вытяжках называют водозэкстрагируемое ОВ (ВЭОВ), а углерод, из которого оно состоит, – водозэкстрагируемый. Весьма схожий подход широко применяется для оценки микробной биомассы с помощью фумигирования почв хлороформом ([Jenkinson 1976](#); [Oren et al., 2018](#); [Vance et al., 1987](#)). Считается, что при обработке парами хлороформа происходит лизис клеток, и углерод микробного происхождения после этой процедуры переходит в водную или солевую вытяжку, поэтому по разнице содержания углерода в вытяжках из фумигированной и нефумигированной почвы можно оценить содержание микробного углерода. Обычно для этого ис-

пользуют экстракцию 0.5 М K_2SO_4 . Однако недавно было показано, что для этой цели допустимо, а по ряду параметров даже предпочтительно, использование экстракции водой ([Swenson et al., 2015](#)). Такой подход позволяет одновременно оценивать содержание углерода ВЭОВ и углерода микробного происхождения, что делает его весьма привлекательным в ряду других подобных методов.

Целью работы было оценить содержание углерода ВЭОВ и углерода микроорганизмов в типичных черноземах разного вида использования. В работе исследованы образцы почв, на которых недавно внедрили новую для России технологию – прямой посев, а также для сравнения – чернозема под традиционной интенсивной технологией с аналогичным плодосменом и вариантов многолетних опытов с деградировавшим и восстанавливающимся ОВ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Типичные черноземы – Protocalcic Chernozems ([WRB, 2015](#)) были отобраны на стационаре ФГБНУ “Курский ФАНЦ” (п. Черемушки, Курского района Курской области). Отбор всех образцов проводили в один день в 2019 г. Отбирали пять индивидуальных образцов методом конверта из которых потом формировали средний образец. На момент отбора образцов осадков не было уже три недели. Данное обстоятельство позволило не рассматривать динамику микробиологической активности, связанной с поступлением осадков или сильно различающимися уровнями влаги в почвах, но при этом сравнивать разные виды использования черноземов. После отбора образцы хранили при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до момента использования.

Были отобраны образцы черноземов 4 вариантов использования:

- 1) Бессменный черный пар с 1964 г. (пар). Здесь не допускается рост сорняков, вариант ежегодно перепахивается с оборотом пласта.
- 2) Залежь с 1998 г. после бессменного черного пара (с 1964 г. по 1998) – часть вышеописанного опыта, которая была отведена под залежь, сегодня там плакорное степное травяное сообщество.

- 3) Прямой посев с 2013 г. (ПП) – опытный четырехпольный зерновой севооборот, плодосмен: озимая пшеница, кукуруза, ячмень, горох, – с прямым посевом культур.
- 4) Контрольный вариант к прямому посеву (традиционная обработка, ТО) – аналогичный плодосмен, но по традиционной технологии с применением вспашки.

Для получения вытяжек из одного смешанного образца брали две навески. В первой – фумигированием осуществляли лизис микробных клеток и определяли содержание углерода в водной вытяжке, во второй – просто определяли содержание углерода в водной вытяжке. Соответственно, по разнице между содержанием углерода в водных вытяжках фумигированной и нефумигированной почвы рассчитывали содержание углерода микробного происхождения.

Для процедуры фумигации первую навеску помещали в вакуумный эксикатор, в котором предварительно устанавливали стакан с хлороформом, не содержащим спирта. Эксикатор закрывали и откачивали из него воздух до начала кипения хлороформа, затем оставляли в темном месте на 24 ч. После экспозиции над парами спускали вакуум, удаляли стакан с хлороформом, а в эксикаторе с почвой 5–6 раз вновь создавали и сбрасывали разряжение для удаления следов паров хлороформа. Затем фумигированную навеску переносили в центрифужную пробирку на 50 мл с завинчивающейся крышкой, заливали деионизованной водой с удельным сопротивлением больше 18 МОм, не содержащей CO₂ в массовом соотношении 1 : 5, и оставляли встряхиваться на обратном ротаторе на ночь. Аналогичную процедуру (все манипуляции, за исключением фумигирования) проводили параллельно со второй (нефумигированной) навеской. В полученных экстрактах определяли содержание растворенного органического углерода (C_{орг.}) на анализаторе TOC-L CSN (Shimadzu, Япония).

Экстракции выполняли в трехкратной повторности. Для оценки значимости различий использовали дисперсионный анализ при уровне значимости 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода ВЭОВ и углерода микробного происхождения показано на рисунке. В зависимости от вида использования рассматриваемый показатель в ВЭОВ варьировал от 168 до 424 мг/л. Минимальное содержание ВЭОВ было обнаружено в варианте пар, максимальное – в черноземе под залежью. При этом значимо ($\alpha = 0.05$) от всех вариантов отличалось только содержание углерода ВЭОВ в черноземе под паром. Ранее нами в этих объектах было определено общее содержание органического углерода, его средние значения составили 2.8, 3.2, 3.4 и 3.8% для пара, ТО, ПП и залежи соответственно ([Холодов и др., 2021а](#); [Холодов и др., 2021б](#)). Эти данные позволили оценить долю ВЭОВ в ОВ черноземов. Она составила 0.69, 0.85, 1.01 и 0.98% от общего органического углерода для пара, ТО, ПП и залежи соответственно. Интересно отметить, что чернозем под прямым посевом (ПП) имеет значение показателя, практически не отличающееся от восстанавливающегося варианта залежь. Возможно, это указывает на активизацию при ПП процессов, сходных с природными.

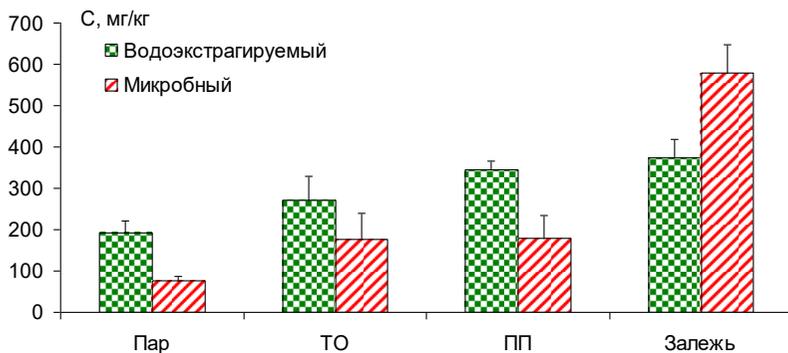


Рис. 1. Содержание водоекстрагируемого углерода и углерода микробного происхождения в типичных черноземах разного вида использования.

Fig. 1. Content of water-extractable carbon and carbon of microbial origin in typical chernozems (Protocalcic Chernozems) of different land-use types.

Содержание микробного углерода (см. рис.) в черноземах изменялось от 66 мг/кг (пар) до 628 мг/кг (залежь), так же, как и в случае ВЭОВ, варианты ТО и ПП занимали промежуточное положение. При этом, согласно данным дисперсионного анализа, от всех вариантов значимо отличались содержания микробного углерода в пару и залежи, а между ТО и ПП значимых отличий не было. Доля микробного углерода от общего составила 0.27, 0.55, 0.53 и 1.52% соответственно вариантам.

Как показали результаты, введение прямого посева не оказало влияния на микробную биомассу. Возникает вопрос: почему при возрастании доли растительных остатков, которое характерно для технологии ПП, не возрастает доля микробного углерода. Ранее было показано, что содержание углерода за одну ротацию (4 года) в варианте ПП значимо выросло, по сравнению с ТО – пахотным контролем ([Холодов и др., 2021a](#)). Наблюдаемые закономерности указывают, что поступающие при ПП растительные остатки, видимо, менее доступны микроорганизмам (по сравнению с пахотным аналогом). С одной стороны, отсутствие обработки способствует восстановлению структуры почвы и, вероятно, включению отмерших подземных частей растений в состав почвенных агрегатов, внутри которых они “физически” защищены от разложения ([Six et al., 2004](#)). С другой стороны, наземная часть жнивья не заделывается в почву, что замедляет ее разложение. Все это может способствовать сохранению микробной биомассы на прежнем, характерном для пахотных черноземов, уровне.

Вариант залежь после черного парования восстанавливался 17 лет. В серии работ было показано, что за это время там сформировался растительный покров, характерный для ненарушенной степи, увеличилось примерно на 1% содержание углерода, однако ряд характеристик (агрегатный состав, строение термолabileй фракции, строение фракции гумусовых кислот, связанных с кальцием) еще близки к варианту пар ([Холодов и др., 2020b](#)). В варианте залежь (единственном в ряду рассматриваемых почв) доля микробного углерода превосходит долю водорастворимого. Возможно, это характерно для восстанавливающихся черноземов. Кроме того, доля углерода ВЭОВ в залежи значимо не отличается от таковой в вариантах ТО и ПП, несмотря на гораздо большую

биомассу микроорганизмов и поступающих ежегодно растительных остатков. Это указывает на высокий расход ВЭОВ в данной почве. Можно предположить, что отчуждение растворенного углерода из почвенного раствора связано, с одной стороны, с его вовлечением в метаболические циклы микроорганизмов (на это указывает высокая доля микробного углерода). С другой – с фиксацией углерода ВЭОВ в более устойчивых пулах (прежде всего в пассивном) в связи с их ненасыщенностью по углероду, вызванной деградацией ОВ в ходе длительного черного парования. Это предположение хорошо согласуется с выводами, сделанными на основе сравнительного анализа содержания денсиметрических фракций, оптических свойств экстрагируемых фракций и молекулярного строения термических фракций этого чернозема ([Холодов и др., 2019](#); [Холодов и др., 2020а](#); [Фарходов и др., 2020](#)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные работы на примере многолетних полевых опытов на черноземах демонстрируют зависимости содержания водоэкстрагируемого и микробного углерода от вида использования почв. Таким образом, показана перспективность применения этих параметров для экспрессной и недорогой оценки состояния биологической компоненты в агроценозах. Ценность ее возрастает при совместном рассмотрении наиболее лабильной и активной фракции органического вещества – ВЭОВ. Весьма перспективно подкрепление подобных данных оптическими характеристиками ВЭОВ и метаболомным анализом водной вытяжки после фумигирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконова К.В. Методы исследования органических веществ почвенных растворов // Почвоведение. 1967. № 6. С. 64–67.
2. Дьяконова К.В., Булеева В.С. Баланс и трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв Центра Нечерноземной зоны // Органическое вещество пахотных почв. М., 1987. С. 12–20.
3. Караванова Е.И. Водорастворимые органические вещества: фракционный состав и возможности их сорбции твердой фазой лесных почв (обзор литературы) // Почвоведение. 2013. № 8. С. 924–936.

4. *Козут Б.М.* Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании: Дис. ... докт. с.-х. наук. М., 1996. 353 с.
5. *Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Хохлов С.Ф., Ильин Б.С., Лазарев В.И., Холодов В.А.* Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 85–107. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-85-107](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-85-107).
6. *Холодов В.А., Белобров В.П., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р., Дридигер В.К., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Влияние технологии прямого посева на распределение органического углерода и азота во фракциях агрегатов черноземов типичных, обыкновенных и южных // Почвоведение. 2021. № 2. С. 240–246.
7. *Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А.* Термостабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020а. № 8. С. 970–982.
8. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Изменение структуры соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов как отклик на вид использования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193.
9. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л.* Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020б. № 6. С. 691–702.
10. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Фарходов Ю.Р., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Распределение органического углерода и азота в размерных фракциях агрегатов типичных черноземов // Почвоведение. 2021. № 3. С. 320–326.
11. *Bengtsson M.M., Attermeyer K., Catalán N.* Interactive effects on organic matter processing from soils to the ocean: are priming effects relevant in aquatic ecosystems? // *Hydrobiologia*. 2018. Vol. 822. P. 1–17.
12. *Chantigny M.H.* Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices // *Geoderma*. 2003. Vol. 113. No. 3–4. P. 357–380.
13. *Gmach M.R., Cherubin M.R., Kaiser K., Cerri C.E.P.* Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review // *Sci. Agric*. 2020. Vol. 77. No. 3. P. 1–10.
14. I.U.S.S. Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils

and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. Rome: FAO, 2105.

15. *Jenkinson D.S.* The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-IV. The decomposition of fumigated organisms in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 1976. Vol. 8. No. 3. P. 203–208.

16. *Oren A., Rotbart N., Borisover M., Bar-Tal A.* Chloroform fumigation extraction for measuring soil microbial biomass: The validity of using samples approaching water saturation // *Geoderma*. 2018. Vol. 319. No. 1. P. 204–207.

17. *Rodrigues S.M., Trindade T., Duarte A.C., Pereira E., Koopmans G.F., Römken P.F.A.M.* A framework to measure the availability of engineered nanoparticles in soils: Trends in soil tests and analytical tools // *TrAC – Trends Anal. Chem.* 2016. Vol. 75. P. 129–140.

18. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., DeNef K.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil and Tillage Research*. 2004. Vol. 79. P. 7–31.

19. *Swenson T.L., Jenkins S., Bowen B.P., Northen T.R.* Untargeted soil metabolomics methods for analysis of extractable organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 80. P. 189–198.

20. *Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C // *Soil Biology and Biochemistry*. 1987. Vol. 19. No. 6. P. 703–707.

REFERENCES

1. Dyakonova K.V., Metody issledovaniya organicheskikh veshchestv pochvennykh rastvorov (Investigation methods of organic compounds of soil solutions, *Pochvovedenie*, 1967, No. 6, pp.46–67.

2. Dyakonova K.V., Buleeva V.S., Balans i transformacija organicheskogo veshchestva dernovo-podzolistykh pochv Cenrtra Nechernozenoi zony (Balance and transformation of organic matter of sod-podzol soils of Centrum of Non-chernozems zone), In: *Organicheskoe veshchestvo pahotnykh pochv* (Organic matter in arable soils), Moscow, 1987, pp. 12–20.

3. Karavanova E.I., Dissolved organic matter: Fractional composition and sorbability by the soil solid phase (Review of literature), *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 8, pp. 833–844, DOI: [10.1134/S1064229313080048](https://doi.org/10.1134/S1064229313080048).

4. Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Khokhlov S.F., Iliyn B.S., Lazarev V.I., Kholodov V.A., The yield values of densimetric fractions from typical chernozems of different land use types, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 103, pp. 85–107, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-85-107](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-85-107).

5. Kogut B.M., *Transformacija gumusnogo sostoyasniya chernozemov pri ih selskohozyajstvennom ispolzovanii: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (Transformation of humic state of Chernozems under agriculture use, Dr. agric. sci. thesis), Moscow, 1996, 353 p.
6. Kholodov V.A., Belobrov V.P., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Yudin S.A., ermolaev N.R., Dridiger V.K., Iliyn B.S., Lazarev V.I., Influence of no-till system on the distribution of organic carbon and nitrogen by aggregate size fractions in Protocalcic, Endocalcic, and Pantocalcic Chernozems, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 2, pp. 285–290, DOI: [10.1134/S1064229321020071](https://doi.org/10.1134/S1064229321020071).
7. Kholodov V.A., Farkhodov Y.R., Yaroslavtseva N.V. et al., Thermolabile and thermostable organic matter of chernozems under different land uses, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 8, pp. 1066–1078, DOI: [10.1134/S1064229320080086](https://doi.org/10.1134/S1064229320080086).
8. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Y.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aydiev A.Ya., Lazarev V.I., Frid A.S., Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems in response to the type of their use, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 2, pp. 162–170, DOI: [10.1134/S1064229319020066](https://doi.org/10.1134/S1064229319020066).
9. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Y.R., Yashin M.A., Ivanov A.L., Lazarev V.I., Iliyn B.S., Philippova O.I., Volikov A.B., Optical properties of the extractable organic matter fractions in typical chernozems of long-term field experiments, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 6, pp. 739–748, DOI: [10.1134/S1064229320060058](https://doi.org/10.1134/S1064229320060058).
10. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Farkhodov Y.R., Iliyn B.S., Lazarev V.I., Contents of organic carbon and nitrogen in particle-size fractions of aggregates of typical chernozems (Protocalcic Chernozems), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 366–371, DOI: [10.1134/S1064229321030078](https://doi.org/10.1134/S1064229321030078).
11. Bengtsson M.M., Attermeyer K., Catalán N., Interactive effects on organic matter processing from soils to the ocean: are priming effects relevant in aquatic ecosystems? *Hydrobiologia*, 2018, Vol. 822, pp. 1–17.
12. Chantigny M.H., Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices, *Geoderma*, 2003, Vol. 113, No. 3–4, pp. 357–380.
13. Gmach M.R., Cherubin M.R., Kaiser K., Cerri C.E.P., Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review, *Sci. Agric.*, 2020, Vol. 77, No. 3, pp. 1–10.
14. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources* 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils

and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2105.

15. Jenkinson D.S., The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-IV. The decomposition of fumigated organisms in soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, Vol. 8, No. 3, pp. 203–208.

16. Oren A., Rotbart N., Borisover M., Bar-Tal A., Chloroform fumigation extraction for measuring soil microbial biomass: The validity of using samples approaching water saturation, *Geoderma*, 2018, Vol. 319, No. 1, pp. 204–207.

17. Rodrigues S.M., Trindade T., Duarte A.C., Pereira E., Koopmans G.F., Römkens P.F.A.M., A framework to measure the availability of engineered nanoparticles in soils: Trends in soil tests and analytical tools, *TrAC – Trends Anal. Chem.*, 2016, Vol. 75, pp. 129–140.

18. Six J., Bossuyt H., Degryze S., DeNef K., A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil and Tillage Research*, 2004, Vol. 79, pp. 7–31.

19. Swenson T.L., Jenkins S., Bowen B.P., Northen T.R., Untargeted soil metabolomics methods for analysis of extractable organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, Vol. 80, pp. 189–198.

20. Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S., An extraction method for measuring soil microbial biomass C, *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, Vol. 19, No. 6, pp. 703–707.