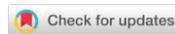


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-224-253



Ссылки для цитирования:

Холодов В.А., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Никитин Д.Н., Данилова-Данильян Е.А., Семенов В.М., Кутовая О.В., Крысанов С.А., Григорьева И.И., Данилин И.В., Иванова Е.А. Водозэкстрагируемое органическое вещество и микробиологическая активность агродерново-подзолистых почв под основными сельскохозяйственными культурами Нечерноземья с разным фоном минерального питания // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 124. “Почвенное органическое вещество”. С. 224-253. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-224-253

Cite this article as:

Kholodov V.A., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Nikitin D.N., Danilova-Danilyan E.A., Semenov M.V., Kutovaya O.V., Krysanov S.A., Grigoreva I.I., Danilin I.V., Ivanova E.A., Water-extractable organic matter and biological activity of sod-podzolic soils under main crops in the Non-Chernozem region with different mineral nutrition background, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 124, “Soil organic matter”, pp. 224-253, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-224-253

Благодарность:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-26-00107, <https://rscf.ru/project/23-26-00107/>.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Scientific Foundation, grant No. 23-26-00107, <https://rscf.ru/project/23-26-00107/>.

**Водозэкстрагируемое органическое вещество и
микробиологическая активность
агродерново-подзолистых почв под основными
сельскохозяйственными культурами
Нечерноземья с разным фоном минерального
питания**

© 2025 г. В. А. Холодов^{1*}, А. Р. Зиганшина^{1**},
Н. Н. Данченко^{1***}, Д. А. Никитин^{1****},

Е. А. Данилова-Данильян^{1***}, М. В. Семенов^{1*****},**
О. В. Кутова^{1***}, С. А. Крысанов²,**
И. И. Григорьева^{1***}, И. В. Данилин^{1*****},**
Е. А. Иванова^{1***}**

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
^{*}<https://orcid.org/0000-0002-6896-7897>, e-mail: ykholod@mail.ru,
^{**}<https://orcid.org/0000-0003-2769-5941>,
^{***}<https://orcid.org/0000-0002-4358-4419>,
^{****}<https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0003-1657-1396>,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0002-7977-2358>,
^{*****}<https://orcid.org/0009-0001-6488-1471>,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0003-1564-5365>,
^{*****}<https://orcid.org/0000-0003-1589-9875>.

²ФГАОУ ВО “Северный (Арктический) федеральный университет имени
М.В. Ломоносова”, Россия,
163002, Архангельск, Набережная Северной Двины, 17.
Поступила в редакцию 08.11.2024, после доработки 01.03.2025,
принята к публикации 21.07.2025

Резюме: В настоящее время актуальна проблема восстановления потенциала обрабатываемых земель Нечерноземья России. В связи с этим важно изучение основных факторов, влияющих на плодородие и устойчивость почв этой зоны. Одним из ведущих факторов, оказывающих влияние на плодородие, равновесие и устойчивость почв, является органическое вещество (ОВ). Его наиболее активная и лабильная во времени и пространстве составляющая – растворенное органическое вещество (РОВ). РОВ активно взаимодействует с живым веществом почв и взаимосвязано с проявлениями биологической активности (БА). Целью работы было оценить оптические свойства водозэкстрагируемого органического вещества (ВЭОВ) и выявить связь с БА агродерново-подзолистых почв под основными сельскохозяйственными культурами с разным фоном элементов минерального питания. Для характеристики оптических свойств использовали спектры поглощения и флуоресценции. БА оценивали по базальному и субстрат-индуцированному дыханию. В результате показано, что оптические свойства ВЭОВ во многом зависят от структуры микробного сообщества. При этом содержание углерода в

ВЭОВ зависело от уровня БА, которая, в свою очередь, во многом определялась присутствием минеральных элементов питания. Внесение удобрений стимулировало микроорганизмы к переработке ОВ. При этом ВЭОВ становилось более разнообразно и более гумусированно.

Ключевые слова: органическое вещество почв; растворенное органическое вещество; базальное дыхание; субстрат-индуцированное дыхание; флуориметрия; спектрофотометрия.

Water-extractable organic matter and biological activity of sod-podzolic soils under main crops in the Non-Chernozem region with different mineral nutrition background

© 2025 V. A. Kholodov^{1*}, A. R. Ziganshina^{1**}, N. N. Danchenko^{1***},
D. N. Nikitin^{1****}, E. A. Danilova-Danilyan^{1*****},
M. V. Semenov^{1*****}, O. V. Kutovaya^{1*****}, S. A. Krysanov²,
I. I. Grigoreva^{1*****}, I. V. Danilin^{1*****}, E. A. Ivanova^{1*****}

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: ykholod@mail.ru,*

*** <https://orcid.org/0000-0003-2769-5941>,*

**** <https://orcid.org/0000-0002-4358-4419>,*

***** <https://orcid.org/0000-0003-1842-1754>,*

****** <https://orcid.org/0000-0003-1657-1396>,*

****** <https://orcid.org/0000-0001-6811-5793>,*

****** <https://orcid.org/0000-0002-7977-2358>,*

****** <https://orcid.org/0009-0001-6488-1471>,*

****** <https://orcid.org/0000-0003-1564-5365>,*

****** <https://orcid.org/0000-0003-1589-9875>.*

²*FGAOU VO “Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov”,*

17 Naberezhnaya Severnaya Dvina, Arkhangelsk 163002, Russian Federation.

Received 08.11.2024, Revised 01.03.2025, Accepted 21.07.2025

Abstract: Presently the problem of restoring the potential of cultivated lands in the Non-Chernozem Region of Russia is quite relevant. Thus, it is pointful to study the main factors influencing the fertility and stability of the soils in this zone. One of the leading factors altering the fertility, equilibrium, and stability

of soils is organic matter. Its most active and labile in time and space component is dissolved organic matter. Dissolved organic matter actively interacts with living matter in soils and is interconnected with manifestations of biological activity. The aim of the work was to evaluate the optical properties of water-extractable organic matter (WEOM) and to reveal the relationship with the biological activity of sod-podzolic soils under different crops with different backgrounds of mineral nutrition elements. Absorption and fluorescence spectra were used to characterize the optical properties. Biological activity was evaluated by basal and substrate-induced respiration. As a result, it was shown that WEOM optical properties largely depend on the structure of the microbial community. At the same time, WEOM carbon content depended on the level of microbial activity, which, in turn, was largely determined by the presence of mineral nutrition elements. Fertilizer application stimulated microorganisms to process organic matter. At the same time, WEOM became more diverse and more humified.

Keywords: soil organic matter; water-extractable organic matter; dissolved organic matter; basal respiration; substrate-induced respiration; EEM; UV-Vis spectrometry.

ВВЕДЕНИЕ

Агродерново-подзолистые почвы Европейской части России несут в себе огромный потенциал увеличения общей урожайности в стране. Многие из них, заброшенные в 90-е годы, сейчас возвращаются или планируются к вовлечению в сельскохозяйственное производство (Митин и др., 2024; Национальный доклад..., 2023). С учетом задач экологизации сельскохозяйственного производства стратегическое сельскохозяйственное планирование должно включать обоснование рационального природопользования (Кирюшин, 2023). Одним из основных факторов, поддерживающих почвенное плодородие и экологическое равновесие, является почвенное органическое вещество (ОВ) (Холодов и др., 2023). При этом его наиболее подвижная часть – растворенное органическое вещество (РОВ) – активно взаимодействует с твердой частью почвы, микробным сообществом, участвует в переносе веществ (Kalbitz et al., 2000; Караванова, 2013). Таким образом, РОВ активно участвует в круговороте углерода и формировании гомеостаза почвенных систем. Состав РОВ очень сложный, оно содержит более тысячи соединений: в нем определены аминокислоты,

протеиноподобные вещества, углеводы, растворимые фенольные соединения, низко- и высокомолекулярные органические кислоты (карбоновые и ароматические), амиды, альдегиды, кетоны, спирты, а также специфические вещества – гуминовые и фульвокислоты (Караванова, 2013). ПОВ играет важную роль в круговороте углерода (Kalbitz et al., 2000), оказывает влияние на подвижность питательных веществ и тяжелых металлов, органических ксенобиотиков, радионуклидов, наночастиц (Караванова, 2013; Куликова, 2020; Чеботина, 1975; Bengtsson et al., 2018; Chantigny, 2003; Li et al., 2019; Rodrigues et al., 2016; Stockdale et al., 2013; Toosi et al., 2014). Также наблюдается и обратная зависимость ПОВ от процессов, протекающих в почве (Gmach et al., 2020). Эта фракция почвенного ОВ наиболее отзывчива на вид использования почв, особенности обработки культур, чем ОВ в целом или его другие фракции (Roper et al., 2010). Например, было показано, что ПОВ позволяет выявить переход от лесной почвы к агроэкосистеме и отражает факт возделывания пропашных культур (Van Gaelen et al., 2014). Внесение растительных остатков оказывает влияние на ПОВ, его контроль позволяет отслеживать процессы их разложения (Chang et al., 2017). Все это делает ПОВ весьма перспективным индикатором состояния ОВ в почве, и особенно его лабильной, доступной микроорганизмам, части. При этом в агроландшафтах Нечерноземной зоны России ПОВ изучено недостаточно.

При изучении ПОВ обычно рассматривают водную вытяжку почв, поэтому исследователь имеет дело с водозэкстрагируемым органическим веществом (ВЭОВ). Перспективным подходом для изучения ВЭОВ является изучения его оптических свойств. С одной стороны, это экспрессный и малозатратный анализ, с другой – достаточно информативный, например, при исследовании многолетних опытов на черноземах были продемонстрированы зависимости оптических свойств ВЭОВ от вида использования и размеров агрегатов (Холодов и др., 2017; Холодов и др., 2020; Куликова и др., 2024).

Целью было оценить оптические свойства ВЭОВ и выявить их связь с биологической активностью агродерново-подзолистых почв под основными сельскохозяйственными культурами с разным фоном элементов минерального питания. В работе использо-

вали почвы многолетних полевых опытов, проводимых Всероссийским НИИ мелиорированных земель.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы агродерново-подзолистой легкосуглинистой глееватой почвы отбирали на опытных площадках Всероссийского НИИ мелиорированных земель Калининского района Тверской области (56°46'29" N, 36°05'22" E). Содержание подвижного фосфора 120–240, калия (по Кирсанову) – 150–200, минеральных форм азота – 9.2–48.0 мг/кг почвы, гумуса – 2.09–2.38 % (по Тюрину), $pH_{\text{сол.}}$ – 4.4. Объемная масса пахотного слоя почвы близка к оптимальному (1.25–1.35 г/см³) на легкосуглинистых почвах. Поля осушены закрытым гончарным дренажом (междренное расстояние – 20 м, глубина заложения дрен – 0.9–1.2 м). В исследованиях использовали четырехпольный плодосменный севооборот: пшеница с подсевом клевера; клевер; озимые зерновые (рожь или тритикале); картофель. Данный опыт также описан в работах Петровой и др. 2020 и 2021 г. Исследованы варианты с применением удобрений и без них. Нормы внесения удобрений: под яровую пшеницу – $N_{90}P_{90}K_{90}$; под картофель – компост многоцелевого назначения 10 т/га + $N_{70}K_{180}$; под клевер – КС1 (60); под озимые зерновые (рожь) – $N_{90}P_{30}K_{90}$. Образцы отбирали осенью, после уборки сельскохозяйственных культур. Дополнительно отобрали образцы расположенной в 180 м от делянок залежи. Отбор образцов проводили в трехкратной повторности из слоя 0–10 см пахотного горизонта в октябре 2022 г. после уборки урожая. Образцы хранили в холодильной камере при температуре +4 °С.

Получение водной вытяжки, определение в ней растворенного углерода и азота, характеристика оптических свойств ВЭОВ ранее были использованы для черноземов и стратоземов (Kholodov et al., 2024).

Получение водной вытяжки проводили ультрачистой водой первого типа с удельным сопротивлением > 18 МОм. Массовое отношение почва вода было 1 : 5. Суспензию встряхивали 8 часов на орбитальном шейкере Biosan PSU-20i со скоростью 180 об./мин, затем отделяли ВЭОВ от осадка центрифугированием при $11\ 135 \times g$ в течение 10 мин, фильтровали через целлюлозную

мембрану с диаметром пор 0.2 мкм. Образцы, предназначенные для определения растворенного углерода, подкисляли до pH 2 соляной кислотой для вытеснения CO₂.

Определение содержания растворенного органического углерода и азота проводили в полученной водной вытяжке на анализаторе Shimadzu TOC-L CSN (ISO 8245:1999).

Оптические исследования ВЭОВ осуществляли методом УФ-видимой спектроскопии и спектрофлуоресценции. УФ-видимые спектры были получены на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 в диапазоне 200–800 нм, раствором сравнения служила ультрачистая вода, использованная для экстракции. На основе полученных данных рассчитывали основные оптические показатели: SUVA₂₅₄, a₂₅₄, E₂/E₃, E₄/E₆, a₃₅₀, S_{275_295}, S_{350_400}, S_{300_700} и SR. SUVA₂₅₄ рассчитывали как оптическую плотность при длине волны 254 нм, нормированную на содержание углерода, S_{275_295} – это крутизна (спад) графика оптической плотности на участке от 275 до 295 нм; S_{350_400} и S_{300_700} – аналогичные показатели для участков 350–400 нм и 300–700 нм соответственно; SR – отношение S_{275_295} к S_{350_400} (Helms et al., 2008; Murphy et al., 2013).

Спектры флуоресценции получали при спектре возбуждения 230–500 нм с шагом 2 нм, спектр эмиссии фиксировали при длинах волн от 250 до 750 нм. Ширина щели возбуждения и эмиссии – 5 нм. Съемку проводили на спектрофлуориметре Shimadzu Rf 6 000, скорость сканирования 60 000 нм/мин. Для обработки спектров использовали пакет StaRdom для языка R. Обработку проводили согласно рекомендациям для обработки матрицы возбуждения-эмиссии флуоресцентных спектров (https://cran.r-project.org/web/packages/staRdom/vignettes/PARAFAC_analysis_of_EEM.html; Murphy et al., 2013). Она включала в себя инструментальную коррекцию спектра, вычитание растворителя (ультрачистая вода), коррекцию на внутренний фильтр по данным спектров поглощения, нормализацию на Рамановские единицы, вычитание Рамановского и Рэлеевского рассеяния, интерполяцию и расчет дескрипторов. После обработки спектров их разлагали на флуоресцирующие компоненты методом параллельного факторного анализа (PARAFAC), модель валидировали с помощью split-half

analysis.

Базальное и субстрат-индуцированное дыхание оценивали согласно Приходько, Сиземской (2015). Для определения активности микробного базального дыхания (БД) навеску свежей почвы (3 г) помещали в пенициллиновые флаконы, герметично закрывали резиновыми пробками и инкубировали в течение суток при температуре 24 °С. Затем из флаконов шприцем отбирали пробу (0.5 мл) и измеряли количество выделившегося CO₂ на газовом хроматографе “М-3700”. Скорость БД выражали в мкг С–CO₂ / (г почвы · ч). Измерение активности субстрат-индуцированного дыхания (СИД) проводили аналогично, за исключением того, что в начале инкубации добавляли к пробе раствор глюкозы (0.2 мл / г почвы).

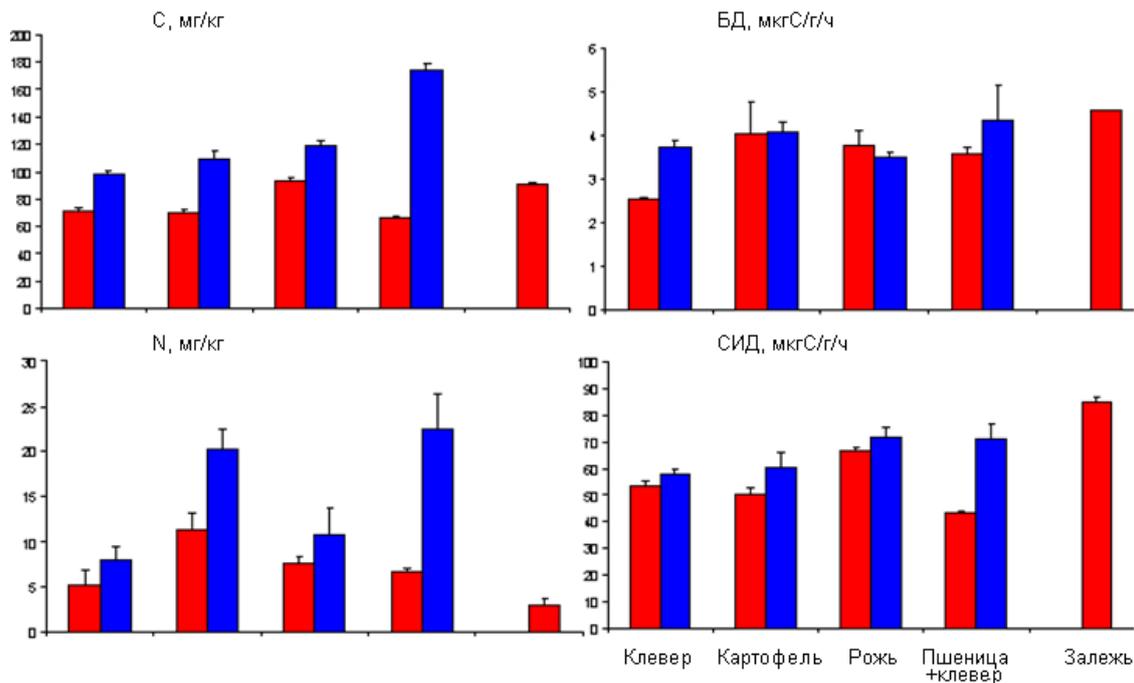
Статистическая обработка данных проводилась в программной среде R и программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные количественные показатели ВЭОВ и БА почв показаны на рисунке 1.

Для оценки влияния сельскохозяйственных культур и применения удобрений на показатели ВЭОВ и БА был проведен двухфакторный дисперсионный анализ, в котором рассматривали факторы “вид культурной растительности” и применение или нет удобрений. Для оценки отличий залежного варианта применялся однофакторный дисперсионный анализ (фактором выступал каждый вариант опыта) с оценкой отличий по критерию Тьюки.

Результаты анализа показали, что содержание углерода в ВЭОВ зависело только от применения удобрений, а сельскохозяйственная культура влияния не оказала. Кроме того, содержание водоекстрагируемого С в варианте залежь также значимо не отличалось от других неудобряемых вариантов. Азот ВЭОВ, напротив, зависел как от вида возделываемой культуры, так и от факта внесения/невнесения удобрений, а в залежи этот показатель был значимо ниже по сравнению со всеми вариантами.



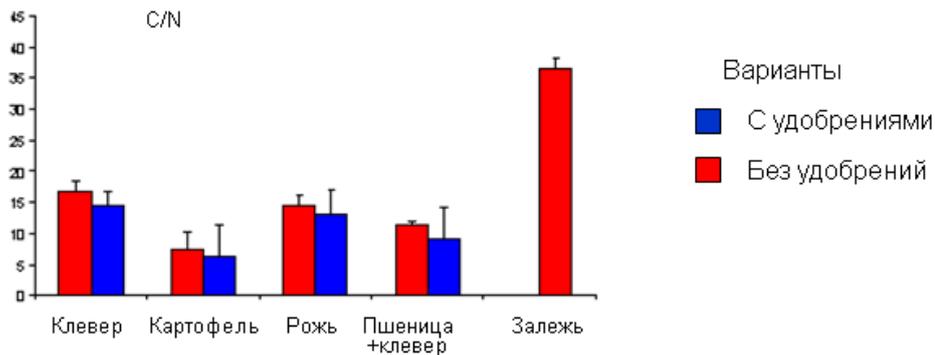


Рис. 1. Основные показатели ВЭОВ: содержание органического углерода (С, мг/кг), азота (N, мг/кг), отношение С / N и биологической активности (БА) в почвах: базальное (БД, мгк С/г/ч) и субстрат-индуцированное дыхание (СИД, мгк С/г/ч).

Fig. 1. Main WEOM indices: organic carbon content (C, mg/kg), nitrogen content (N, mg/kg), C / N ratio and soil biological activity: basal (BD, mgC/g/h) and substrate-induced respiration (SIR, mgC/g/h).

Отношение C/N значительно изменялось только в зависимости от сельскохозяйственной культуры, удобрения на показатель влияния не оказывали, в залежи этот показатель был значительно выше среди всех вариантов.

Таким образом, содержание C зависит только от дозы и типа применяемых удобрений. Вероятно, элементы питания стимулируют микробиологическую активность, которая ускоряет переработку OB и перевод его в растворимую форму. В пользу этого говорят относительно низкие показатели C/N , по сравнению с залежью, снижение C/N обычно указывает на более переработанное OB (Grandy et al., 2007, Hatton et al., 2012).

Зависимость азота $ВЭОВ$ от вида возделываемой культуры и от факта применения удобрений указывает на разную потребность растений в элементах питания. Кроме того, вероятно, на уровень азота $ВЭОВ$ влияют не только сами растения, но и их ризосферное окружение. На это указывает зависимость базального дыхания только от видов культур, в то же время субстрат-индуцированное дыхание зависит как от вида растений, так и от применения удобрений. Таким образом, при индуцировании микробиологической деятельности несколько вырастает СИД в варианте “с удобрениями”, очевидно, активируя акцессорное (лабильное) микробное сообщество (Тхакахова и др., 2015), которое получает импульс к развитию при внесении легкодоступного субстрата на фоне относительного избытка минеральных элементов.

При этом корреляционный анализ между показателями $ВЭОВ$ и микробиологической активностью выявил положительные значимые связи содержания водоекстрагируемого углерода с БД и СИД ($r = 0.42$ и 0.52 соответственно при $n = 27$), для азота подобных зависимостей выявлено не было. Отсутствие прямой связи между уровнями БА и содержанием азота указывает, что не во всех рассматриваемых ценозах этот элемент является лимитирующим фактором.

Качественные различия в $ВЭОВ$ оценивали по их оптическим свойствам. Отличия в индексах спектров поглощения в зависимости от возделываемых растений и внесения удобрений показаны на рисунке 2.

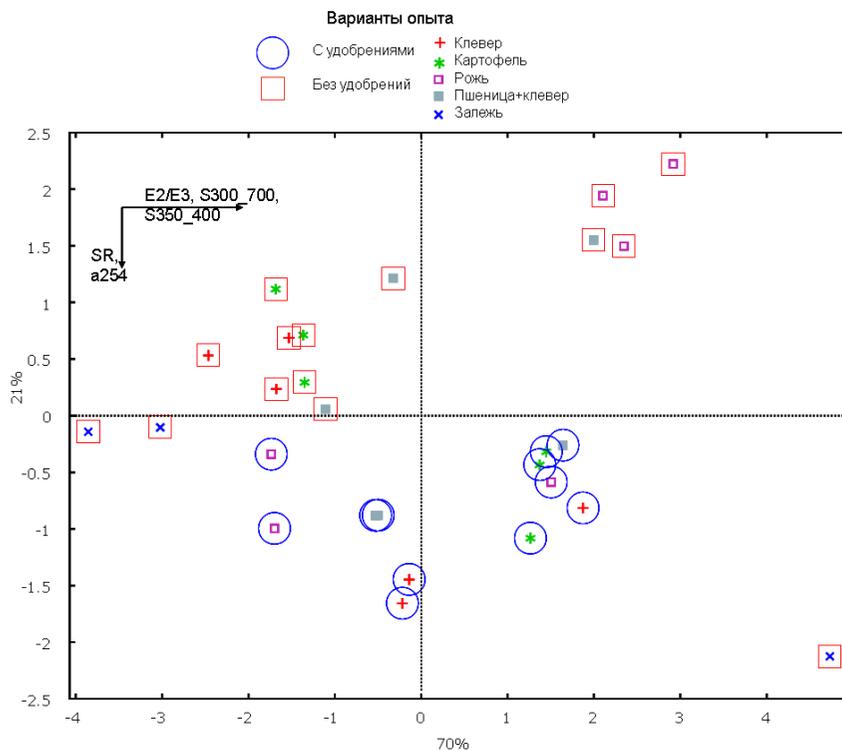


Рис. 2. Классификация ВЭОВ в пространстве главных компонент в зависимости от индексов спектров поглощения.

Fig. 2. WEOM classification in principal component space depending on the indices of absorption spectra.

Первая главная компонента (ГК1) описывает 70% отличий, вторая главная компонента (ГК2) – 21%. Все варианты опыта достаточно хорошо кластеризуются по вариантам. Сельскохозяйственные культуры хорошо отделяются по первой компоненте, причем все варианты также разнесены по оси ГК1 в вариантах “с удобрениями” и “без удобрений”, исключение – вариант “Пшеница+клевер”, который по ГК1 не различается. По второй компоненте четко видны различия, обусловленные применением удобре-

ний: все варианты с удобрениями расположены в отрицательной части ГК2, а без удобрений – в положительной. Особняком стоит кластер варианта “Залежь”, он расположен в области вариантов с удобрениями. Однако для данного варианта характерно отсутствие дефицита питательных элементов, так что его расположение в зоне объектов с применением удобрений оправдано. Примечательно, что нельзя выделить область, зависящую от формы внесения удобрений: компост или минеральные вещества в разных сочетаниях, виден только факт применения удобрений.

Собственные векторы с максимальными модульными значениями использовали для оценки вклада индексов в различия ВЭОВ. Сдвиг в положительную область по ГК1 происходит с увеличением E2/E3, S300_700 и S350_400. Эти показатели отражают индивидуальные особенности ВЭОВ в опытных вариантах. Сдвиг по ГК2 в отрицательную область сопровождается увеличением индексов SR и a254 и переходом от неудобряемых вариантов к удобряемым. Увеличение SR отражает снижение микробной продукции в ВЭОВ с удобрениями (Helms et al., 2008) и увеличение ее ароматичности, что сопровождается возрастанием a254 (Mann et al., 2016). Таким образом, внесение удобрений способствует трансформации ВЭОВ в сторону более ароматических соединений.

Данные о флуоресценции РОВ были обработаны параллельным факторным анализом (PARAFAC). Из полученных трехмерных спектров возбуждения-эмиссии были выделены 4 флуоресцирующих компонента C1–C4 (рис. 3).

Выделенные PARAFAC компоненты были сопоставлены с открытой базой данных OpenFluor, позволяющей соотнести их показатели флуоресценции со свойствами или происхождением флуоресцентных составляющих РОВ, описанных в предыдущих исследованиях. Для сопоставления использовали ранее описанные компоненты со степенью совпадения не менее 95% (табл. 1).

Компонент C1 интерпретируется в литературе как “гуминовые вещества микробного происхождения”, т. е. новообразованное (прогуминовое) вещество, являющееся промежуточным продуктом микробной трансформации опада. Спектральные характеристики компонентов C2 и C3 схожи, вследствие чего их интерпре-

тация также практически одинакова – их связывают с наземным конденсированными гуминовыми веществами, но С2, предположительно, имеет больше ароматических фрагментов в своем составе.

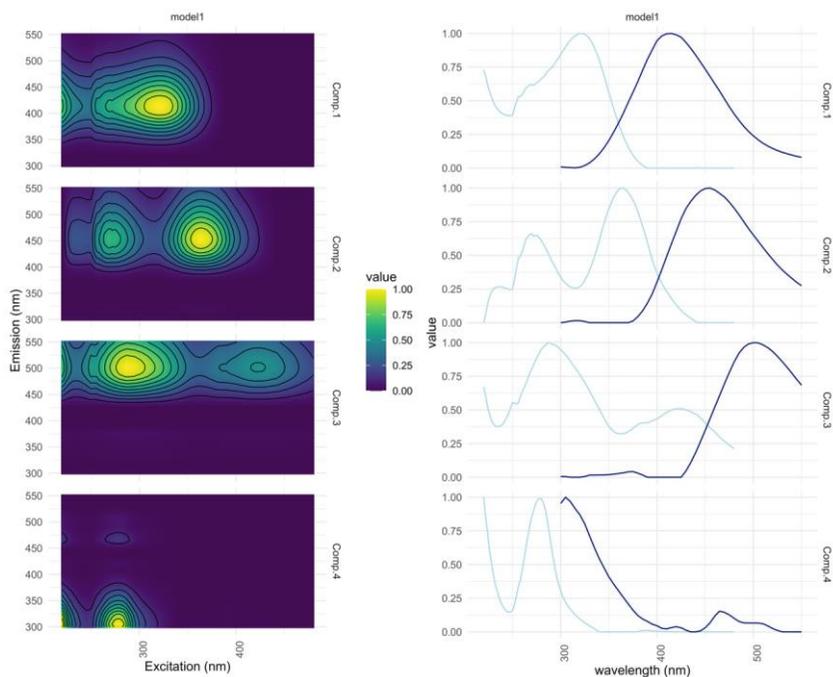


Рис. 3. Выделенные методом PARAFAC флуорофоры в составе ВЭОВ; слева – матрицы возбуждения-эмиссии компонентов, справа – соответствующие спектры возбуждения (бледно-синий) и испускания (темно-синий).

Fig. 3. Fluorophores isolated by the PARAFAC method as part of WEOM; excitation-emission matrices of the components on the left, and the corresponding excitation (pale blue) and emission (dark blue) spectra on the right.

Таблица 1. Индивидуальные флуоресцирующие компоненты ВЭОВ, идентифицированные с помощью PARAFAC-моделирования, и их предположительные свойства

Table 1. Individual fluorescent components, identified with PARAFAC-modeling, and their suggested features

Компонент	Длина волны возбуждения, нм	Длина волны эмиссии, нм	Интерпретация
C1	320	415	Пик М (Coble, 2007), гуминовое вещество микробного происхождения (Chen et al., 2016; Chen et al., 2018; Gamrani et al., 2023; Gao et al., 2017; Yamashita et al., 2013)
C2	270, 365	455	Пики А, С (Coble, 2007), ароматическое наземное гуминовые вещества (Begum et al., 2022; Gao et al., 2018; Yamashita et al., 2013)
C3	290, 425	500	Наземные гуминовые вещества (Gullian-Klanian et al., 2021; Schittich et al., 2018; Wunsch et al., 2017), подверженное биodeградации гидрофобное гуминовое вещество (Sharma et al., 2017)
C4	280	305	Пики В, Т (Coble, 2007), продукт трансформации белков (Chen et al., 2016; Gao et al., 2018; Imbeau et al., 2021; Kida et al., 2019; Pucher et al., 2021; Romero et al., 2017; Zhuang et al., 2021)

Компонент С4 связывается с флуоресценцией триптофана (в меньшей степени – тирозина) и, таким образом, присутствием в жидкой фазе продуктов неполной деструкции белковых молекул.

Распределение объектов согласно флуоресцирующим компонентам, выделенным PARAFAC в пространстве главных компонент, показано на рисунке 4.

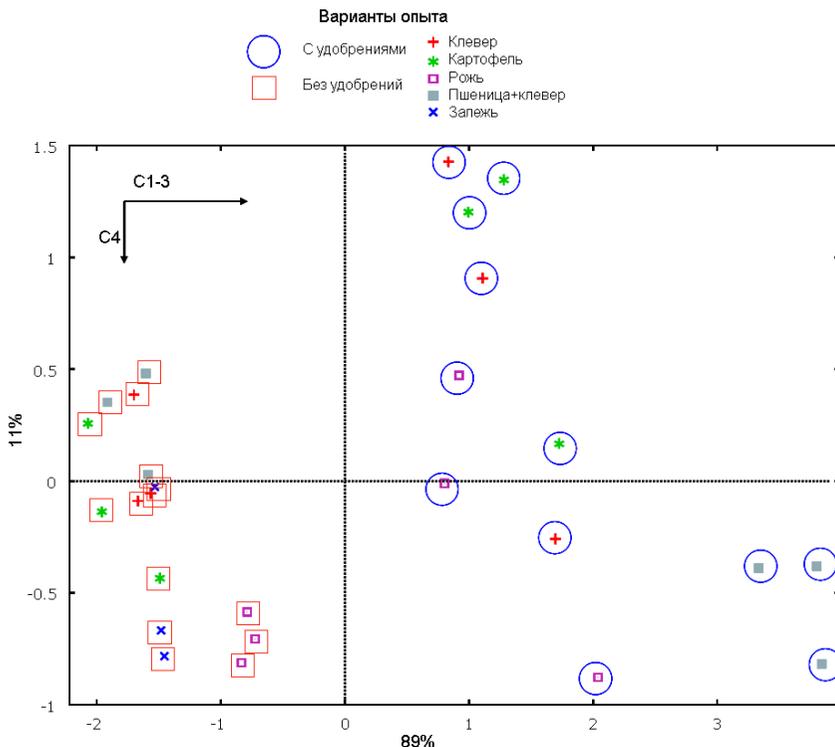


Рис. 4. Классификация ВЭОВ в пространстве главных компонент в зависимости от величин флуоресцирующих компонентов.

Fig. 4. WEOM classification in principal component space depending on the magnitudes of fluorescent components.

По ГК1 четко отделены варианты с удобрениями (положительная часть оси) от вариантов без удобрений (отрицательная

часть). В этом случае “Залежь” попала в область опытных вариантов без удобрений. За разделение по оси ГК1 отвечают компоненты С1–С3: они все возрастают при внесении удобрений. Таким образом, удобрения увеличивают разнообразие ВЭОВ, обогащая его соединениями различной степени трансформированности.

Компонент С4 обеспечивает варьирование по второй главной компоненте. По видам сельскохозяйственных культур можно выделить несколько кластеров: кластер, объединяющий образцы залежи и всех культур без внесения удобрений, за исключением ржи; кластер ржи без удобрений; кластер пшеницы и клевера с внесением удобрений; и кластер ржи, клевера и картофеля с внесением удобрений.

Выше было отмечено, что показатели биологической активности – БД и СИД – положительно коррелировали с содержанием углерода в ВЭОВ. Для выявления связей между оптическими свойствами ВЭОВ и биологической активностью их почв был проведен мультикорреляционный анализ, в котором БД и СИД сопоставляли с показателями поглощения и флуоресценции ВЭОВ (рис. 5).

Среди всех индексов поглощения только a_{254} значимо положительно коррелировал с СИД. Для других индексов взаимосвязи показано не было. Среди флуоресцентных показателей С1 (гуминовые вещества микробного происхождения) значимо коррелировал с БД. Корреляция a_{254} с СИД указывает на обогащение ВЭОВ ароматической составляющей при интенсивной, индуцированной внесением субстрата, переработке ОВ микроорганизмами. Вполне вероятно, что помимо растворенного ОВ, в этот процесс вовлекается и ОВ, находящееся в нерастворимом состоянии. В пользу этого говорит описанная выше корреляция между СИД и содержанием углерода в ВЭОВ. Весьма интересна связь между БД и С1. Базальное дыхание, фиксируемое без стимуляции микробиологической деятельности, в первую очередь, должно отражать переработку доступных субстратов, С1 – свежееобразованное ОВ (см. табл. 1). Таким образом, флуоресцирующий компонент С1 обогащает ВЭОВ за счет микробного преобразования доступных субстратов, скорее всего, растительного опада.

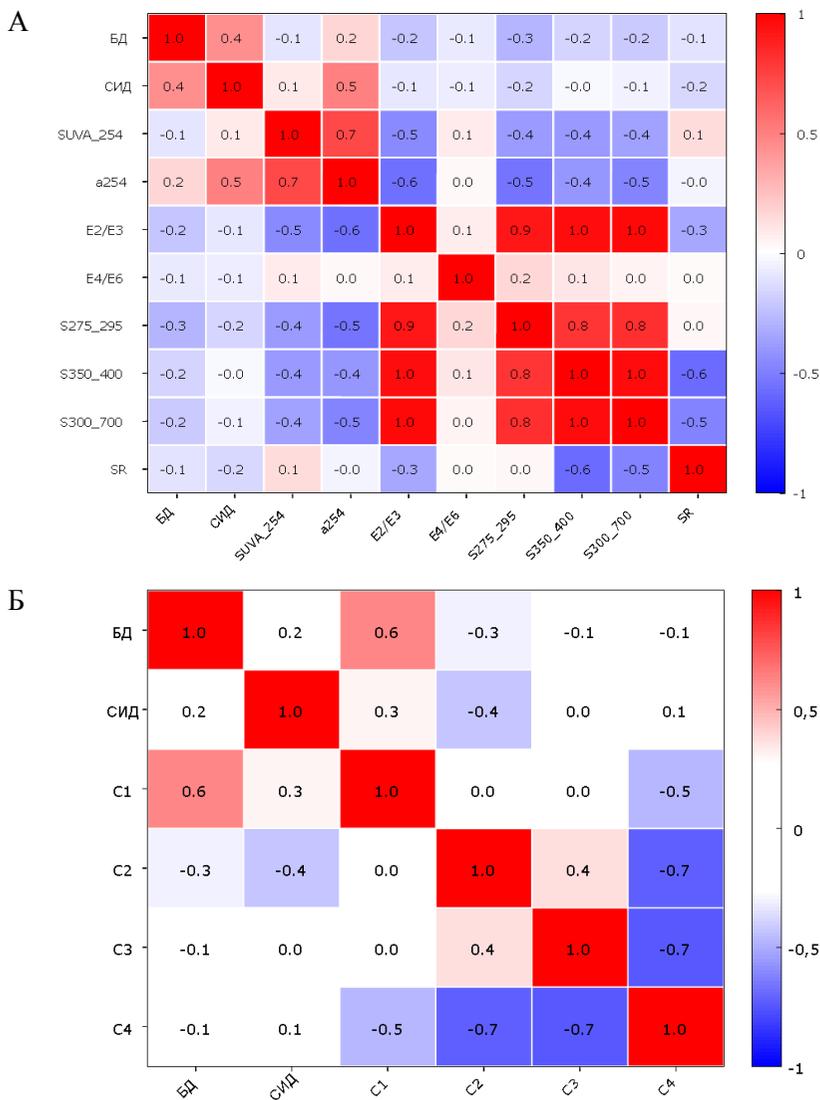


Рис. 5. Корреляционные матрицы для показателей биологической активности и индексов поглощения (А); и флуоресцирующих компонентов (Б).
Fig. 5. Correlation matrices for biological activity and uptake indices (А); and fluorescent components (Б).

При планировании работ мы ожидали, что С4 будет связан с показателями биологической активности, в первую очередь с СИД. Это объясняется тем, что С4 отражает содержание в ВЭОВ флуоресцирующих составляющих аминокислот и, соответственно, белков, и должен быть связан с микробной биомассой, а следовательно, и с СИД. Однако ожидаемой связи выявлено не было, поэтому было подробно исследовано корреляционное поле зависимости С4 от СИД. Для этого на графике зависимости С4 от СИД были отдельно выделены варианты с удобрениями, без удобрений, а также залежь, и для них построены линейные тренды (рис. 6).

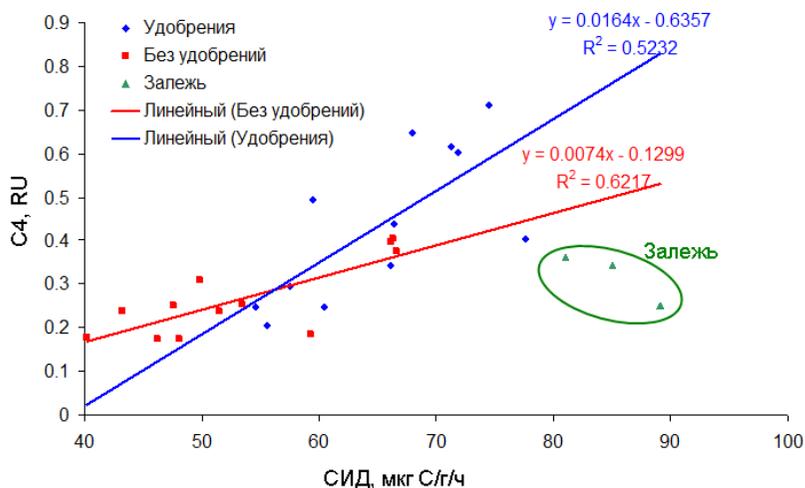


Рис. 6. Зависимость флуоресцирующей компоненты С4 ВЭОВ от субстрат-индуцированного дыхания.

Fig. 6. С4 WEOM fluorescent component dependence on substrate-induced respiration.

При рассмотрении в отдельности вариантов с удобрениями и без таковых видны четкие линейные зависимости С4 от СИД. Коэффициенты аппроксимации соответствуют коэффициентам корреляции 0.79 и 0.72, которые являются значимыми для $\alpha = 0.01$. Таким образом, внесение удобрений существенно изменяет

взаимосвязи между биомассой (которая жестко связана с СИД) и попадающими в раствор белковыми компонентами. С4 возникает в результате лизиса клеток, т. е. белковая компонента в составе живых клеток не присутствует в ВЭОВ, для их перехода туда необходим лизис клеток (Холодов и др., 2022). Лизаты – ценный субстрат, поэтому они достаточно быстро поглощаются биотой. Вероятно, возникает равновесие между биомассой и лизатами в ВЭОВ. Однако уровни, на которых устанавливается равновесие, могут быть разные в зависимости от особенностей микробного сообщества, поэтому связь между СИД и лизатами в ВЭОВ можно обнаружить для сообществ близких по своей структуре. Следовательно, внесение удобрений в агродерново-подзолистую почву вызывает существенное изменение структуры микробного сообщества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание углерода в ВЭОВ зависело от уровня микробиологической активности, которая, в свою очередь, во многом определялась присутствием минеральных элементов питания. Внесение удобрений стимулировало микроорганизмы к переработке ОВ. При этом ВЭОВ становилось более разнообразно и более гумусированно. В нем возрастало содержание флуоресцирующих компонент, связанных с переработанным ОВ, и повышалась ароматичность (согласно показателю a_{254}). При этом сопоставление с залежью указывает на то, что внесение удобрений стимулирует микроорганизмы к переработке ОВ, и способствует его переходу из твердой фазы почвы в РОВ. В то же время в залежи, на фоне достаточно высоких показателей БД и СИД, уровень С в ВЭОВ достаточно низкий – близок к показателю вариантов без удобрений. Таким образом, в равновесных условиях (залежь) высокий уровень биологической активности не способствует переработке почвенного ОВ и перевода его в РОВ. Вероятно, это связано с низким уровнем минеральных элементов питания в этой почве и, как следствие, иной структурой микробного сообщества.

В целом в работе показано, что оптические свойства ВЭОВ во многом зависят от структуры микробного сообщества. Однако требуется дальнейшее накопление данных для выяснения проис-

хождения и судьбы этой наиболее лабильной части почвенного
ОВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Караванова Е.И.* Водорастворимые органические вещества: фракционный состав и возможности их сорбции твердой фазой лесных почв // Почвоведение. 2013 № 8. С. 924–936.
2. *Кирюшин В.И.* Задачи оптимизации землепользования в России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 5–25. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-116-5-25>.
3. *Куликова Н.А.* Влияние водорастворимых компонентов почв на размер и электрокинетический потенциал наноалмазов // Почвоведение. 2020. № 7. С. 816–827.
4. *Куликова Н.А., Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Зиганишина А.Р., Заварзина А.Г., Карпухин М.М.* Растворенное органическое вещество черноземов различного вида использования: взаимосвязь структурных особенностей и минерального состава // Вестник Московского университета. 2024. Серия 17: Почвоведение. Т. 74. № 1. С. 24–32.
5. *Митин С.Г., Сысоев Г.В., Старостин И.А., Ещин А.В.* Технико-технологическое обеспечение вовлечения в оборот залежных земель // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 276–308. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-276-308>.
6. Национальный доклад о ходе и результатах реализации в 2022 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2023. 159 с.
7. *Петрова Л.И., Митрофанов Ю.И., Первушина Н.К., Гуляев М.В.* Влияние различных факторов на формирование урожая и качество картофеля // Аграрный вестник Урала. 2021. № 4 (207). С. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-207-04-34-42>.
8. *Петрова Л.И., Митрофанов Ю.И., Первушина Н.К., Лапушкина В.Н.* Влияние удобрений и погодных условий на формирование урожая яровой пшеницы на осушаемых землях // Земледелие. 2020. № 4. С. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10403>.
9. *Приходько В.Е., Сиземская М.Л.* Базальное дыхание и состав микробной биомассы целинных, агро- и лесомелиорированных полупустынных почв Северного Прикаспия // Почвоведение. 2015. № 8. С. 974–983.
10. *Тхакахова А.К., Чернов Т.И., Иванова Е.А., Кутовая О.В., Козут Б.М.,*

- Завалин А.А.* Изменение метагенома прокариотного сообщества черноземов под воздействием минеральных удобрений // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 6. С. 20–23.
11. *Холодов В.А., Иванов В.А., Фарходов Ю.Р., Сафронова Н.А., Артемьева З.С., Ярославцева Н.В.* Оптические характеристики фракций органического вещества агрегатов типичных черноземов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 56–72. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72>.
12. *Холодов В.А., Розова О.Б., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Волков Д.С., Зиганишина А.Р., Ярославцева Н.В.* Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 52–100. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.
13. *Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Данченко Н.Н., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Водэкстрагируемый и микробный углерод черноземов разного вида использования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 122–133. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133>.
14. *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. 2020. № 6. С. 691–702. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060052>.
15. *Чеботина М.Я.* Влияние водорастворимого вещества лесной подстилки на поглощение радиоактивных изотопов в почве // Радиозэкологические исследования почв и растений. Сер. “Труды Института экологии растений и животных”. 1975. С. 21–25.
16. *Begum M.S., Lee M.H., Park T.J., Lee S.Y., Shin K. H., Shin H.S., Chen M., Hur J.* Source tracking of dissolved organic nitrogen at the molecular level during storm events in an agricultural watershed // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 810.
17. *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 (1). P. 1–17.
18. *Chang D.N., Cao W.D., Bai J.S., Gao S.J., Wang X.C., Zeng N.H., Katsuyoshi S., Spectrosc.* Effects of green manures on soil dissolved organic matter in moisture soil in North China // Spectral Anal. 2017. Vol. 37 (1). P. 221–226.
19. *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 (3–4). P. 357–380.

20. *Chen M., Jung J., Lee Y.K., Hur J.* Surface accumulation of low molecular weight dissolved organic matter in surface waters and horizontal off-shelf spreading of nutrients and humic-like fluorescence in the Chukchi Sea of the Arctic Ocean // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 639. P. 624–632.

21. *Chen X., Liu M., Kuzyakov Y., Li W., Liu J., Jiang C., Meng Wu, Li Z.* Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence // *Applied Soil Ecology*. 2018. Vol. 130. P. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.004>.

22. *Coble P.G.* Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy // *Marine Chemistry*. 1996. Vol. 51 (4). P. 325–346.

23. *Gaelen van N., Verschoren V., Clymans W., Poesen J., Govers G., Vanderborght J., Diels J.* Controls on dissolved organic carbon export through surface runoff from loamy agricultural soils // *Geoderma*. 2014. Vol. 226–227. P. 387–396.

24. *Gamrani M., Eert J., Gueguen C., Williams W.J.* A river of terrestrial dissolved organic matter in the upper waters of the central Arctic Ocean // *Deep Sea Res 1 Oceanogr Res Pap*. 2023. Vol. 196.

25. *Gao Z., Guéguen C.* Distribution of thiol, humic substances and colored dissolved organic matter during the 2015 Canadian Arctic GEOTRACES cruises // *Mar Chem*. 2018. Vol. 203. P. 1–9.

26. *Gao Z., Guéguen C.* Size distribution of absorbing and fluorescing DOM in Beaufort Sea, Canada Basin // *Deep Sea Res 1 Oceanogr Res Pap*. 2017. Vol. 121. P. 30–37.

27. *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 (3). P. 1–10.

28. *Grandy A.S., Neff J.C., Weintraub M.N.* Carbon structure and enzyme activities in alpine and forest ecosystems // *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. Vol. 39 (11). P. 2701–2711.

29. *Gullian-Klanian M., Gold-Bouchot G., Delgadillo-Diaz M., Aranda J., Sanchez-Solis M.J.* Effect of the use of *Bacillus* spp. on the characteristics of dissolved fluorescent organic matter and the phytochemical quality of *Stevia rebaudiana* grown in a recirculating aquaponic system // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. No. 27. P. 36326–36343.

30. *Hatton P.J., Kleber M., Zeller B., Moni C., Plante A.F., Townsend K., Gelhaye L., Lajtha K., Derrien D.* Transfer of litter-derived N to soil mineral-organic associations: Evidence from decadal ¹⁵N tracer experiments // *Organic Geochemistry*. 2012. Vol. 42. (12). P. 1489–1501.

31. *Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // *Limnology and Oceanography*. 2008. Vol. 53 (3). P. 955–969.
32. *Imbeau E., Vincent W.F., Wauthy M., Cusson M.* Hidden Stores of Organic Matter in Northern Lake Ice: Selective Retention of Terrestrial Particles, Phytoplankton and Labile Carbon // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021. Vol. 126. No. 8.
33. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC).
34. *Kalbitz K., Solinger S., Park J.H., Michalzik B., Matzner E.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review // *Soil Science*. 2000. Vol. 165. P. 277–304.
35. *Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Farkhodov Y.R., Maksimovich S.V., Zhidkin A.P.* Water-Extractable Organic Matter of Soils with Different Degrees of Erosion-Induced Degradation and Sedimentation in a Small Catchment in the Central Forest-Steppe Part of the Central Russian Upland: Tilled Soils // *Eurasian Soil Science*. 2024. Vol. 57 (6). P. 889–902.
36. *Kida M., Kojima T., Tanabe Y., Hayashi K., Kudoh S., Maie N., Fujitake N.* Origin, distributions, and environmental significance of ubiquitous humic-like fluorophores in Antarctic lakes and streams // *Water Research*. 2019. Vol. 163. P. 114901.
37. *Mann P.J., Spencer R.G.M., Hernes P.J., Six J., Aiken G.R., Tank S.E., McClelland J.W., Butler K.D., Dyda R.Y., Holmes R.M.* Pan-Arctic Trends in Terrestrial Dissolved Organic Matter from Optical Measurements // *Frontiers in Earth Science*. 2016. Vol. 4.
38. *Murphy K.R., Stedmon C.A., Graeber D., Bro R.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC // *Anal. Methods*. 2013. Vol. 5 (23). P. 6557–6566.
39. *Pucher M., Wunsch U., Weigelhofer G., Murphy K., Hein T., Graeber D.* StaRdom: Versatile software for analyzing spectroscopic data of dissolved organic matter in R // *Water (Switzerland)*. 2019. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11112366>.
40. *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 // *Trends Anal. Chem.* 2016. Vol. 75. P. 129–140.
41. *Romero C.M., Engel R.E., D`Andrill J., Chen C., Zabinski C., Miller P., Wallander R.* Bulk optical characterization of dissolved organic matter from semiarid wheat-based cropping systems // *Geoderma*. 2017. Vol. 306. P. 40–

49.

42. *Roper M.M., Gupta V., Murphy D.* Tillage practices altered labile soil organic carbon and microbial function without affecting crop yields // Australian Journal of Soil Research. 2010. Vol. 48. P. 274–285.

43. *Schittich A.R., Wunsch U., Kulkarni H.V., Battistel M., Bregnhøj H., Stedmon C.A., Mcknight U.S.* Investigating Fluorescent Organic-Matter Composition as a Key Predictor for Arsenic Mobility in Groundwater Aquifers // Environ Sci Technol. American Chemical Society. 2018. Vol. 52. No. 22. P. 13027–13036.

44. *Sharma P., Laor Y., Raviv M., Medina S., Saadi I., Krasnovsky A., Vager M., Levy G.J., Bar-Tal A., Borisover M.* Compositional characteristics of organic matter and its water-extractable components across a profile of organically managed soil // Geoderma. 2017. Vol. 286. P. 73–82.

45. *Stockdale A., Bryan N.D.* The influence of natural organic matter on radionuclide mobility under conditions relevant to cementitious disposal of radioactive wastes: A review of direct evidence // Earth-Science Rev. 2013. Vol. 121. P. 1–17.

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

47. *Toosi E.R., Schmidt J.P., Castellano M.J.* Land use and hydrologic flowpaths interact to affect dissolved organic matter and nitrate dynamics // Biogeochemistry. 2014. Vol. 120 (1–3). P. 89–104.

48. *Wünsch U.J., Murphy K.R., Stedmon C.A.* The One-Sample PARAFAC Approach Reveals Molecular Size Distributions of Fluorescent Components in Dissolved Organic Matter // Environ Sci Technol. American Chemical Society. 2017. Vol. 51. No. 20. P. 11900–11908.

49. *Yamashita Y., Boyer J.N., Jaffé R.* Evaluating the distribution of terrestrial dissolved organic matter in a complex coastal ecosystem using fluorescence spectroscopy // Cont Shelf Res. 2013. Vol. 66. P. 136–144.

50. *Zhuang W.E., Chen W., Cheng Q., Yang L.* Assessing the priming effect of dissolved organic matter from typical sources using fluorescence EEMs-PARAFAC // Chemosphere. 2021. Vol. 264.

REFERENCES

1. Karavanova E.I., Vodorastvorimye organicheskie veshchestva: fraktsionnyi sostav i vozmozhnosti ikh sorbtsii tverdoi fazoi lesnykh pochv (Dissolved organic matter: Fractional composition and sorbability by the soil solid phase), *Pochvovedenie*, 2013, No. 8, pp. 924–936.
2. Kiryushin V.I., The goals of land use optimization in Russia, *Dokuchaev*

Soil Bulletin, 2023, Vol. 116, pp. 5–25, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-116-5-25>.

3. Kulikova N.A., Vliyaniye vodorastvorimykh komponentov pochv na razmer i elektrokineticheskiy potentsial nanoalmazov (Influence of water-soluble soil components on the size and electrokinetic potential of nanodiamonds), *Pochvovedenie*, 2020, No. 7, pp. 816–827.

4. Kulikova N.A., Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Ziganshina A.R., Zavarzina A.G., Karpukhin M.M., Rastvorennoe organicheskoe veshchestvo chernozemov razlichnogo vida ispol'zovaniya: vzaimosvyaz' strukturnykh osobennosti i mineral'nogo sostava (Dissolved Organic Matter of Chernozems of Different Use: Relationship of Structural Features and Mineral Composition), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2024, Vol. 74, No. 1, pp. 24–32.

5. Mitin S.G., Sysoev G.V., Starostin I.A., Eshchin A.V., Technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 118, pp. 276–308, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-276-308>.

6. National report on the progress and results of the implementation in 2022 of the State Program for the Development of Agriculture and Regulation of Agricultural Products, Raw Materials and Food Markets, Moscow: Ministerstvo sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii, 2023, 159 p.

7. Petrova L.I., Mitrofanov Yu.I., Pervushina N.K., Gulyaev M.V., Influence of various factors on crop formation and potato quality, *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2021, No. 4 (207), pp. 34–42, DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-207-04-34-42>.

8. Petrova L.I., Mitrofanov Yu.I., Pervushina N.K. et al., Influence of fertilizers and weather conditions on the formation of spring wheat yield on drained lands, *Zemledelije*, 2020, No. 4, pp. 12–15, DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10403>.

9. Prikhod'ko V., Sizemskaya M.L., Basal respiration and composition of microbial biomass in virgin and agroforest-reclaimed semidesert soils of the Northern Caspian region, *Eurasian Soil Science*, 2015, No. 48, pp. 852–861, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229315080049>.

10. Tkhakhkova A.K., Chernov T.I., Ivanova E.A., Kutovaya O.V., Kogut B.M., Zavalin A.A., Izmenenie metagenoma prokariotnogo soobshchestva chernozemov pod vozdеistviem mineral'nykh udobrenii (Changes in metagenome prokaryotic community chernozems under the influence of mineral fertilizers), *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2015, No. 6, pp. 20–23.

11. Kholodov V.A., Ivanov V.A., Farkhodov J.R., Safronova N.A., Artemyeva Z.S., Jaroslavceva N.V., The Optical Characteristics of Aggregates Organic

Matter Fractions in Typical Chernozems, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp. 56–72, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72>.

12. Kholodov V.A., Rogova O.B., Lebedeva M.P., Varlamov E.B., Volkov D.S., Ziganshina A.R., Yaroslavtseva N.V., Organic matter and mineral matrix of soils: modern approaches, definitions of terms and methods of study (review), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 52–100, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>.

13. 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, Vol. 112, pp. 122–133, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133>.

14. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Yu.R., Yashin M.A., Lazarev V.I., Il'in B.S., Filippova O.I., Volikov A.B., Ivanov A.L., Opticheskie kharakteristiki ekstragiruemykh fraktsii organicheskogo veshchestva tipichnykh chernozemov v mnogoletnikh polevykh opytakh (Optical Properties of Extractable Fractions of Organic Matter of the Chernozems Measured in Long-Term Field Experiments), *Pochvovedenie*, 2020, No. 6, pp. 691–702,

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060052>.

15. Chebotina M.Ya., Vliyaniye vodorastvorimogo veshchestva lesnoy podstilki na pogloshcheniye radioaktivnykh izotopov v pochve (Effect of water-soluble matter of forest litter on the absorption of radioactive isotopes in soil), *Radioekologicheskkiye issledovaniya pochv i rasteniy. Ser. "Trudy Instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh"* (Radioecological studies of soils and plants. Series: "Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology"), 1975, pp. 21–25.

16. Begum M.S., Lee M.H., Park T.J., Lee S.Y., Shin K.H., Shin H.S., Chen M., Hur J., Source tracking of dissolved organic nitrogen at the molecular level during storm events in an agricultural watershed, *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 810.

17. 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 (1), pp. 1–17.

18. Chang D.N., Cao W.D., Bai J.S., Gao S.J., Wang X.C., Zeng N.H., Katsuyoshi S., Spectrosc. Effects of green manures on soil dissolved organic matter in moisture soil in North China, *Spectral. Anal.*, 2017, Vol. 37 (1), pp. 221–226.

19. 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 (3–4), pp. 357–380.

20. Chen M., Jung J., Lee Y.K., Hur J., Surface accumulation of low molecular weight dissolved organic matter in surface waters and horizontal off-shelf spreading of nutrients and humic-like fluorescence in the Chukchi Sea of the Arctic Ocean, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 639, pp. 624–632.
21. Chen X., Liu M., Kuzyakov Y., Li W., Liu J., Jiang C., Meng Wu, Li Z., Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence, *Applied Soil Ecology*, 2018, Vol. 130, pp. 84–90, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.004>.
22. Coble P.G., Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy, *Marine Chemistry*, 1996, Vol. 51 (4), pp. 325–346.
23. Gaalen van N., Verschoren V., Clymans W., Poesen J., Govers G., Vanderborght J., Diels J., Controls on dissolved organic carbon export through surface runoff from loamy agricultural soils, *Geoderma*, 2014, Vol. 226–227, pp. 387–396.
24. Gamrani M., Eert J., Gueguen C., Williams W.J., A river of terrestrial dissolved organic matter in the upper waters of the central Arctic Ocean, *Deep Sea Res 1 Oceanogr Res Pap.*, 2023, Vol. 196.
25. Gao Z., Guéguen C., Distribution of thiol, humic substances and colored dissolved organic matter during the 2015 Canadian Arctic GEOTRACES cruises, *Mar Chem.*, 2018, Vol. 203, pp. 1–9.
26. Gao Z., Guéguen C., Size distribution of absorbing and fluorescing DOM in Beaufort Sea, Canada Basin, *Deep Sea Res 1 Oceanogr Res Pap.*, 2017, Vol. 121, pp. 30–37.
27. 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 (3), pp. 1–10.
28. Grandy A.S., Neff J.C., Weintraub M.N., Carbon structure and enzyme activities in alpine and forest ecosystems, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, Vol. 39 (11), pp. 2701–2711.
29. Gullian-Klanian M., Gold-Bouchot G., Delgadillo-Diaz M., Aranda J., Sanchez-Solis M.J., Effect of the use of *Bacillus* spp. on the characteristics of dissolved fluorescent organic matter and the phytochemical quality of *Stevia rebaudiana* grown in a recirculating aquaponic system, *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, Vol. 28, No. 27, pp. 36326–36343.
30. Hatton P.J., Kleber M., Zeller B., Moni C., Plante A.F., Townsend K., Gelhaye L., Lajtha K., Derrien D., Transfer of litter-derived N to soil mineral-organic associations: Evidence from decadal ¹⁵N tracer experiments, *Organic Geochemistry*, 2012, Vol. 42. (12), pp. 1489–1501.
31. Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K.,

Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter, *Limnology and Oceanography*, 2008, Vol. 53 (3), pp. 955–969.

32. Imbeau E., Vincent W.F., Wauthy M., Cusson M., Hidden Stores of Organic Matter in Northern Lake Ice: Selective Retention of Terrestrial Particles, Phytoplankton and Labile Carbon, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2021, Vol. 126, No. 8.

33. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC).

34. Kalbitz K., Solinger S., Park J.H., Michalzik B., Matzner E., Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review, *Soil Science*, 2000, Vol. 165, pp. 277–304.

35. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Farkhodov Y.R., Maksimovich S.V., Zhidkin A.P., Water-Extractable Organic Matter of Soils with Different Degrees of Erosion-Induced Degradation and Sedimentation in a Small Catchment in the Central Forest-Steppe Part of the Central Russian Upland: Tilled Soils, *Eurasian Soil Science*, 2024, Vol. 57 (6), pp. 889–902.

36. Kida M., Kojima T., Tanabe Y., Hayashi K., Kudoh S., Maie N., Fujitake N., Origin, distributions, and environmental significance of ubiquitous humic-like fluorophores in Antarctic lakes and streams, *Water Research*, 2019, Vol. 163, pp. 114901.

37. Mann P.J., Spencer R.G.M., Hernes P.J., Six J., Aiken G.R., Tank S.E., McClelland J.W., Butler K.D., Dydá R.Y., Holmes R.M., Pan-Arctic Trends in Terrestrial Dissolved Organic Matter from Optical Measurements, *Frontiers in Earth Science*, 2016, Vol. 4.

38. Murphy K.R., Stedmon C.A., Graeber D., Bro R., Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC, *Anal. Methods*, 2013, Vol. 5 (23), pp. 6557–6566.

39. Pucher M., Wunsch U., Weigelhofer G., Murphy K., Hein T., Graeber D., StaRdom: Versatile software for analyzing spectroscopic data of dissolved organic matter in R, *Water (Switzerland)*, 2019, Vol. 11, DOI: <https://doi.org/10.3390/w11112366>.

40. 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, *Trends Anal. Chem.*, 2016, Vol. 75, pp. 129–140.

41. Romero C.M., Engel R.E., D'Andrill J., Chen C., Zabinski C., Miller P., Wallander R., Bulk optical characterization of dissolved organic matter from semiarid wheat-based cropping systems, *Geoderma*, 2017, Vol. 306, pp. 40–49.

42. Roper M.M., Gupta V., Murphy D., Tillage practices altered labile soil organic carbon and microbial function without affecting crop yields, *Australian Journal of Soil Research*, 2010, Vol. 48, pp. 274–285.
43. Schittich A.R., Wunsch U., Kulkarni H.V., Battistel M., Bregnhøj H., Stedmon C.A., Mcknight U.S., Investigating Fluorescent Organic-Matter Composition as a Key Predictor for Arsenic Mobility in Groundwater Aquifers, *Environ Sci Technol. American Chemical Society.*, 2018, Vol. 52, No. 22, pp. 13027–13036.
44. Sharma P., Laor Y., Raviv M., Medina S., Saadi I., Krasnovsky A., Vager M., Levy G.J., Bar-Tal A., Borisover M., Compositional characteristics of organic matter and its water-extractable components across a profile of organically managed soil, *Geoderma*, 2017, Vol. 286, pp. 73–82.
45. Stockdale A., Bryan N.D., The influence of natural organic matter on radionuclide mobility under conditions relevant to cementitious disposal of radioactive wastes: A review of direct evidence, *Earth-Science Rev.*, 2013, Vol. 121, pp. 1–17.
46. Swenson T.L., Jenkins S., Bowen B.P., Northen T.R., Untargeted soil metabolomics methods for analysis of extractable organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 2015, Vol. 80, pp. 189–198.
47. Toosi E.R., Schmidt J.P., Castellano M.J., Land use and hydrologic flowpaths interact to affect dissolved organic matter and nitrate dynamics, *Biogeochemistry*, 2014, Vol. 120 (1–3), pp. 89–104.
48. Wünsch U.J., Murphy K.R., Stedmon C.A., The One-Sample PARAFAC Approach Reveals Molecular Size Distributions of Fluorescent Components in Dissolved Organic Matter, *Environ Sci Technol. American Chemical Society*, 2017, Vol. 51, No. 20, pp. 11900–11908.
49. Yamashita Y., Boyer J.N., Jaffé R., Evaluating the distribution of terrestrial dissolved organic matter in a complex coastal ecosystem using fluorescence spectroscopy, *Cont Shelf Res.*, 2013, Vol. 66, pp. 136–144.
50. Zhuang W.E., Chen W., Cheng Q., Yang L., Assessing the priming effect of dissolved organic matter from typical sources using fluorescence EEMs-PARAFAC, *Chemosphere*, 2021, Vol. 264.