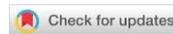


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-96-128



Ссылки для цитирования:

Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Рогова О.Б. Изменение гидрофобно-гидрофильных свойств черноземов под действием и после действия минеральных удобрений // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 96-128. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-96-128

Cite this article as:

Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu., Rogova O.B., Changes in hydrophobic-hydrophilic properties of chernozems under the influence of mineral fertilizers and their aftereffect, Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 109, pp. 96-128, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-96-128

Изменение гидрофобно-гидрофильных свойств черноземов под действием и после действия минеральных удобрений

© 2021 г. Н. В. Матвеева^{1*}, Е. Ю. Милановский²,
О. Б. Рогова¹

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

* <https://orcid.org/0000-0003-4335-3407>, e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Поступила в редакцию 02.06.2021, после доработки 09.11.2021,
принята к публикации 16.12.2021

Резюме: Исследовали образцы почв и выделенные из них гранулоденсиметрические фракции (илистую с размером частиц менее 1 мкм, легкую (ЛФ) с плотностью менее 2 г/см³ и фракцию остатка) чернозема обыкновенного опытных полей агроландшафта Каменная Степь Воронежской области. Основные отличия вариантов опыта заключаются в применении или прекращении внесения минеральных удобрений, а также в последствии орошения (13 лет). Наблюдается увеличение содержания ЛФ при применении минеральных удобрений, а также изменение состава гранулоденсиметрических фракций, выражающееся в различном содержании С и N и гидрофобно-

гидрофильных компонентов гумусовых веществ (ГВ) почв, ила и ЛФ. Влияние орошения практически не отразилось на гидрофобно-гидрофильном составе ГВ исходных почв, в то время как относительное содержание гидрофильных компонентов ГВ их илистой фракции увеличилось, а ГВ ЛФ снизилось. Применение минеральных удобрений привело к значительному варьированию степени гидрофильности ГВ ила и ЛФ при меньшем изменении этого показателя для ГВ почвы в целом. Отмена применения удобрений, напротив, отразилась как на изменении гидрофобно-гидрофильного состава ГВ самой почвы, так и на составе ГВ ила и ЛФ. Увеличение доли гидрофильных компонентов в составе ГВ почв, а также в составе ГВ ила и ЛФ происходило одновременно с увеличением гидрофобности поверхности твердой фазы почв и при увеличении содержания углерода в почве, что свидетельствует об устойчивости системы в целом. Так как физические фракции почв интенсивнее реагировали на изменения агрогенной нагрузки, по сравнению с образцами нативных почв, и изменения в их качественном составе прослеживались в двух вариантах опыта, мониторинг гидрофобно-гидрофильных компонентов ГВ почв и почвенных гранулоденсиметрических фракций целесообразно проводить для контроля и диагностики изменений почв при сельскохозяйственном использовании.

Ключевые слова: жидкостная хроматография гидрофобного взаимодействия, гранулоденсиметрическое фракционирование почв, гидрофильность, гидрофобность, краевой угол смачивания.

Changes in hydrophobic-hydrophilic properties of chernozems under the influence of mineral fertilizers and their aftereffect

© 2021 N. V. Matveeva^{1*}, E. Yu. Milanovsky², O. B. Rogova¹

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

**<https://orcid.org/0000-0003-4335-3407>, e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.*

Received 02.06.2021, Revised 09.11.2021, Accepted 16.12.2021

Abstract: Soil samples and granulodensimetric fractions isolated from them ((silt particle size less than 1 μm , light fraction (LF) with a density of less than 2 g/cm^3 and a fraction of the residues) of ordinary chernozem from

experimental fields of the Kamennaya Steppe agricultural landscape of the Voronezh region were studied. The main differences between the variants of the experiment are introducing or stopping mineral fertilizers, and in the aftereffect of irrigation (13 years). There is an increase in the content of LF when using mineral fertilizers, as well as a change in the composition of size-density fractionations, expressed in different content of C and N and hydrophobic-hydrophilic components of humus substances (HS) of soils, silt and LF. The irrigation had practically no effect on the hydrophobic-hydrophilic composition of the initial soils, while the relative content of the hydrophilic components of the silt fraction of the soil increased, and the hydrophilic composition of HS LF decreased. The use of mineral fertilizers led to a significant variation in the degree of hydrophilicity of HS in silt and LF with a smaller change of this indicator for the HS of the soil as a whole. The abolition of fertilizers application, on the contrary, affected the hydrophobic-hydrophilic composition of the soil as a whole, and the composition of the soil silt and LF. The increase in the proportion of hydrophilic components in the composition of soil HS, as well as in the composition of HS silt and LF occurred simultaneously with an increase in the hydrophobicity of the surface of the solid phase of soil and with an increase in the carbon content in the soil, which indicates the stability of the system as a whole. Since the physical fractions of soils reacted more intensively to changes in the agrogenic load, compared with native soil samples, and changes in their qualitative composition were traced in two versions of the experiment, monitoring of hydrophobic-hydrophilic components of soil and soil granulodensimetric fractions is advisable to monitor and diagnose soil changes during agricultural use.

Keywords: liquid chromatography of hydrophobic interaction, size-density fractionation of soils, hydrophilicity, hydrophobicity, contact angle of wetting.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика смачиваемости твердой фазы сельскохозяйственных земель является актуальной задачей во всем мире ([Fidanza et al., 2020](#)). Прежде всего это связано с водной и ветровой эрозией, с борьбой с последствиями засух и ухудшением структуры почв. Способность почвы смачиваться определяет большинство почвенных процессов: потоки воды в почвенном профиле, доступность элементов питания для растений и почвенной биоты, устойчивость почвенной структуры и направленность деградационных процессов. Большое количество исследований, посвященных гидрофобности почв, направлено на изучение влия-

ния конкретных сельскохозяйственных культур на гидрофобно-гидрофильные свойства почв, отдельно рассматривается влияние пожаров и различные виды механической обработки земель ([Roper et al., 2013](#); [Bughici, Wallach, 2016](#); [Mao et al., 2019](#); [Chen et al., 2020](#)). Изучение гидрофобно-гидрофильных свойств твердой фазы проводят в модельных экспериментах с использованием смесей песка, глины, растительных остатков и корневых выделений различных сельскохозяйственных культур ([Benard et al., 2018](#)). В лабораторных условиях гидрофобно-гидрофильные свойства твердой фазы почв определяют путем измерения краевого угла смачивания (КУС) – методом подъема капиллярной каймы ([Adamson, 1990](#)) или же методом сидячей капли ([Ryley, Khoshaim, 1977](#)). В полевых условиях смачиваемость почв часто оценивают по времени инфильтрации (water drop penetration time, WDPT) ([Bahrani et al., 1973](#); [Doerr, 1998](#)). Регулирование смачиваемости почв является важной задачей современного почвоведения и сельского хозяйства. Исследователи рассматривают множество способов регулирования смачиваемости почв: применение поверхностно активных веществ, глины, модифицированных гуминовых кислот из бурого угля, удобрений, использование дождевых червей, адаптивной растительности, орошения, аэрации/уплотнения почвы ([Müller, Deurer, 2011](#); [Cihlár et al., 2014](#); [Daniel et al., 2019](#); [Ogunmokun et al., 2020](#)). Однако несмотря на разработку и применение большого количества веществ, регулирующих смачиваемость почв, естественная регуляция этого явления остается актуальной фундаментальной задачей ([Oostindie et al., 2010](#); [Tadayonnejad et al., 2017](#); [Fidanza et al., 2020](#)).

Как известно, смачиваемость поверхности твердой фазы гумусовых горизонтов почв во многом зависит от состава и свойств компонентов органического вещества (ОВ) почв ([Doerr et al., 2000](#); [Ellerbrock et al., 2005](#); [Mao et al., 2014](#)). При этом комплексных исследований изменения гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности твердой фазы почв и изменения состава и свойств ОВ почв сравнительно мало ([Mao et al., 2019](#); [Drahorad et al., 2020](#); [Miller et al., 2020](#)). В природе ОВ почв находится в гидратированном виде, поэтому наличие в его структуре гидрофобных и гидрофильных функциональных групп определяет пространственную

конфигурацию ОВ и характер его взаимодействия с минеральной частью почвы. Гидрофобным зонам молекул ОВ энергетически более выгодно минимизировать площадь контакта с водой, в то время как гидрофильные части молекул ОВ будут обращены в водную среду. В работе Cihlár ([Cihlár et al., 2014](#)) к гуминовым кислотам, выделенным из бурого угля, применили процедуру формальдегидного сшивания, основанную на ковалентном связывании фрагментов ароматических гуминовых кислот, с целью создания добавки для регулирования гидрофобно-гидрофильных свойств почвы. Авторы пришли к выводу, что расстояние между функциональными группами гуминовых кислот является решающим фактором, определяющим количество сконденсированной на них воды. Даже небольшое изменение в строении гуминовых кислот в микроскопическом масштабе может иметь большие последствия в макромире, что по-прежнему важно учитывать при планировании стратегий охраны окружающей среды, сельского хозяйства и защиты почв. Состав ГВ чувствителен к видам агрогенной нагрузки, при этом любые изменения в строении ГВ повлияют на их амфифильные свойства. Влияние распашки, поступления или отсутствия свежего растительного материала и экссудатов корней на состав и свойства ГВ почв подробно описано ранее ([Матвеева и др., 2021](#)). Цель данной работы – выявить изменения ГВ почв ила и ЛФ под действием и после действия минеральных удобрений. Применение удобрений способствует смещению равновесия в происходящих в почве процессах. Отмечается снижение рН при применении минеральных удобрений ([Głab, Gondek, 2014](#); [Wang et al., 2019](#)). Наблюдается снижение обменного Ca^{2+} при увеличении доли Mg^{2+} и Na^+ . При долгосрочном применении минеральных удобрений без органических может ускориться минерализация ГВ, снизиться качество почвы за счет изменения микробиологической активности и повышения доступности токсичных элементов для растений ([Menšík et al., 2018](#)). Многочисленные долгосрочные эксперименты на разных сельскохозяйственных почвах (Китай ([Su et al., 2006](#); [Hai et al., 2010](#)), Австрия ([Dersch, Böhm, 2001](#)), Чехия ([Menšík et al., 2018](#))) показывают, что поддержание и увеличение содержания ОВ в почве дает совместное применение неорганических удобрений с органическими ([Hao et al., 2008](#); [Hai et al., 2010](#);

[Šimon, Czakó, 2014](#); [Wei et al., 2016](#)). Однако помимо количества ОВ в сельскохозяйственных почвах меняется и качественный состав ОВ при применении удобрений ([Zimmermann et al., 2007](#); [Kaur et al., 2008](#)). Удобрения прежде всего влияют на продуктивность растений и пул микроорганизмов, которые, в свою очередь, изменяют количество и качество поступаемого в почву ОВ, а также скорость его минерализации. Отмечается, что сельскохозяйственное использование почв, при котором повышается содержание органического С в почве, повышает гидрофобность (водоотталкивающую способность) и снижает смачиваемость почвы ([Šimon, Czakó, 2014](#)).

ОВ в почве может находиться в свободном или окклюдированном виде, а также быть сорбировано на минеральных поверхностях. Различия в формах ОВ отражаются на скорости его трансформации. Качественный анализ почвенного ОВ проводят с учетом его принадлежности к определенной физической фракции, основные отличия между фракциями обусловлены особенностями органо-минеральных взаимодействий. Существует большое количество методов фракционирования почв, однако ни один из них не способен выделить свежее ОВ, а также полностью отделить органо-минеральную фракцию. Авторы обзора современных методов фракционирования почв ([Poeplau et al., 2018](#)) подчеркивают, что выбор метода обычно обусловлен множеством факторов, начиная от цели исследования и заканчивая возможными ресурсами. Нами была выбрана методика гранулоденсиметрического фракционирования по М.Ш. Шаймухаметову ([Шаймухаметов и др., 1984](#)). Данная методика предполагает отделение фракции ила с размером частиц меньше 1 мкм, преимущественно состоящую из органо-минеральных компонентов, ЛФ с плотностью меньше 2 г/см³, представленную как свободным ОВ, так и органо-минеральными соединениями устойчивыми к ультразвуковой обработке, а также фракцию остатка с плотностью больше 2 г/см³. Выделение меньшего количества фракций, которые при этом принципиально отличаются по своему составу, снижает погрешность при выделении фракций, что позволяет сравнивать результаты разных экспериментов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является чернозем территории Воронежского НИИСХ: Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева Каменная Степь, Россия. Объект расположен в Таловском районе Воронежской области в центральной части водораздела рек Хопер и Битюг, левых притоков реки Дон. Почвообразующей породой данной территории являются четвертичные покровные лёссовидные глины и суглинки различной мощности ([Басов, Грищенко, 1963](#)). Климат Каменной Степи умеренно континентальный с холодной зимой и теплым (нередко жарким и засушливым) летом, что типично для степей. Водный режим черноземов Каменной Степи периодически промывной с дополнительным грунтовым увлажнением ([Лебедева и др., 2016](#)).

Исследованы почвенные образцы 7 делянок из слоя 0–20 см, двух вариантов использования:

а – варианты с постоянным внесением минеральных удобрений в соответствии с требованием севооборота (действия), удобрения вносили с 1992 г., и последствием орошения (13 лет);

б – после прекращения внесения (последствия) минеральных удобрений NPK, удобрения вносили с 1992 по 2009 гг.

Опытные делянки расположены на полях отдела Агрохимии и Кормопроизводства ФГБНУ Воронежского федерального аграрного научного центра им. В.В. Докучаева. На каждой делянке отобрано от 3 до 5 смешанных образцов с помощью бура (2013 г.). Удобрения вносили под культуры севооборота таким образом, что в каждом варианте опыта (а и б) были сформированы делянки, отличающиеся между собой по степени удобренности в два раза, обозначенные NPK и 2NPK соответственно. Диапазоны вносимых доз удобрений указаны в таблице 1.

Исследуемая почва, по классификации 1977 г. ([Егоров и др., 1977](#)), – чернозем обыкновенный среднегумусный среднемощный глинистый на покровной карбонатной лёссовидной глине; по классификации 2004 г. ([Шишов и др., 2004](#)), – агрочернозем; согласно классификации WRB, исследуемая почва – Anthrosols ([WRB, 2014](#)).

Таблица 1. Схема вариантов опыта
Table 1. Scheme of experience options

Делянка		Удобрения	Орошение	Севооборот
a	Контроль (К)	-	-	Кормовой: ячмень, кукуруза на силос, кормовая свекла, горох + овес + эспарцет, эспарцет 1-го года, эспарцет 2-го года, эспарцет 3-го года, ячмень, кукуруза на силос, кормовая свекла, козлятник, козлятник.
	Контроль (Ко)	-	30 лет до 2000 г.	
	НРКо	от $N_{30}P_{30}K_{30}$ до $N_{90}P_{90}K_{100}$	30 лет до 2000 г.	
	2НРКо	от $N_{60}P_{60}K_{60}$ до $N_{120}P_{150}K_{150}$	30 лет до 2000 г.	
b	Контроль (К)	-	-	Зерно-пропашной: горох, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, кукуруза на зерно, горох, тритикале, просо, ячмень, кукуруза на зерно.
	НРК	от 0 до $N_{105}P_{105}K_{105}$	-	
	2НРК	от $N_{30}P_{60}K_{60}$ до $N_{105}P_{105}K_{105}$	-	

Примечание. о – последствие орошения.

Аналитическая характеристика образцов почв включала: общее содержание С и N методом сухого сжигания на автоматическом CNSH-анализаторе Vario Isotope ЦКП Института Географии РАН. Погрешность измерения составляла $<0.5\%$. Разделение фракций ОВ по степени связи с минеральной матрицей почв проводилось методом гранулоденсиметрического фракционирования воздушно-сухих образцов почв ([Шаймухаметов и др., 1984](#)). Выделены 3 фракции: фракция ила с размером частиц менее 1 мкм, легкая фракция (ЛФ) с плотностью $<2 \text{ г/см}^3$ и фракция остатка с плотностью $>2 \text{ г/см}^3$. Фракционирование включало 2 основные операции:

1. Выделение илистых частиц путем обработки суспензии почвы ультразвуком (УЗ) Branson Digital с последующим центрифугированием в Eppendorf Centrifuge 5810 R. Для этого навеска почвы равная 40 г помещалась в пластмассовую бутылку объемом 450 мл и заливалась 400 мл дистиллированной воды. УЗ обработка при мощности 40% длилась 2 минуты, энергия диспергации достигала 450 Дж/мл. Центрифугировали с относительным ускорением 783 g 3 минуты. Для каждого образца было проведено 10 циклов обработки УЗ и 20 циклов центрифугирования. Всю надосадочную жидкость сливали в стеклянные банки и выпаривали на водяной бане при 80 °C в фарфоровых чашках.

2. Выделение легкой фракции (ЛФ) проводилось с помощью бромформ-этанольной смеси с плотностью 2 г/см³. Почвенные образцы, оставшиеся после выделения ила, количественно переносили в центрифужные пробирки на 50 мл, которые заполнялись тяжелой жидкостью. Пробирки взбалтывали на ротаторе US-1350L ULAB 10 минут на максимальной скорости (350 оборотов в минуту) для гомогенизации раствора, затем центрифугировали с относительным ускорением 1 509 g в течение 5 минут. ЛФ с плотностью $<2 \text{ г/см}^3$ оказывалась сверху, образуя на поверхности плотный темноокрашенный слой (“пробку”), и отделялась от тяжелой фракции (ТФ) с плотностью $>2 \text{ г/см}^3$, так называемой фракции остатка. Взбалтывание и центрифугирование повторяли до прекращения выделения ЛФ, в среднем 10 циклов. Выделенную ЛФ переносили в делительные воронки, которые заполняли дистиллированной водой, интенсивно взбалтывали и оставляли на

ночь. В делительной воронке происходило следующее разделение по плотности: вниз перемещался бромформ, не смешивающийся с водой, над ним был слой ЛФ, выше – водно-спиртовая смесь. Бромформ сливали отдельно для последующей регенерации. ЛФ переносили в центрифужные пробирки, заливали этанолом (с концентрацией 98%) и повторяли циклы взбалтывания-центрифугирования с целью промывки фракции от остатков бромформа. С фракцией остатка проводили аналогичную процедуру. ЛФ и фракция остатка были высушены на водяной бане при 80 °С, чтобы избежать изменения их свойств.

В выделенных фракциях ила и остатка был проведен анализ гранулометрического состава методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3 000 ([Yudina et al., 2018](#)) с целью проверки полноты фракционирования. Фракция ила более чем на 90% представлена частицами <1 мкм, фракция остатка имеет размер частиц преимущественно 2–50 мкм.

Изучение качественного состава ГВ щелочных экстрактов из образцов почв и гранулоденсиметрических фракций проведено с помощью метода жидкостной хроматографии гидрофобного взаимодействия ([Милановский, 2000](#)). Экстракцию ГВ почв проводили щелочным раствором пирофосфата натрия (0.1 н NaOH + 0.1 н Na₄P₂O₇) при соотношении образец : раствор 1 : 10 (40 °С, 24 часа). От минеральных примесей экстракт ГВ очищали центрифугированием (12 000 об/мин, 15 мин). Жидкостная хроматография гидрофобного взаимодействия проведена на хроматографе среднего давления Bio Rad. Хроматографическая матрица Octyl Sepharosa CL-4B (SIGMA, Германия), колонка 1 × 10 см, скорость фильтрации 1.5 мл/мин, детектирование оптической плотности элюата при длине волны 280 нм. Площадь пиков хроматографических фракций рассчитывали при помощи программы Мульти-Хром. Площадь пика хроматографической фракции, выраженная в процентах от общей площади хроматограммы, дает представление об относительном содержании компонентов ГВ, различающихся по гидрофобно-гидрофильным свойствам. На рисунке 1 представлен пример получаемых хроматограмм для ГВ почвы, ила и ЛФ.

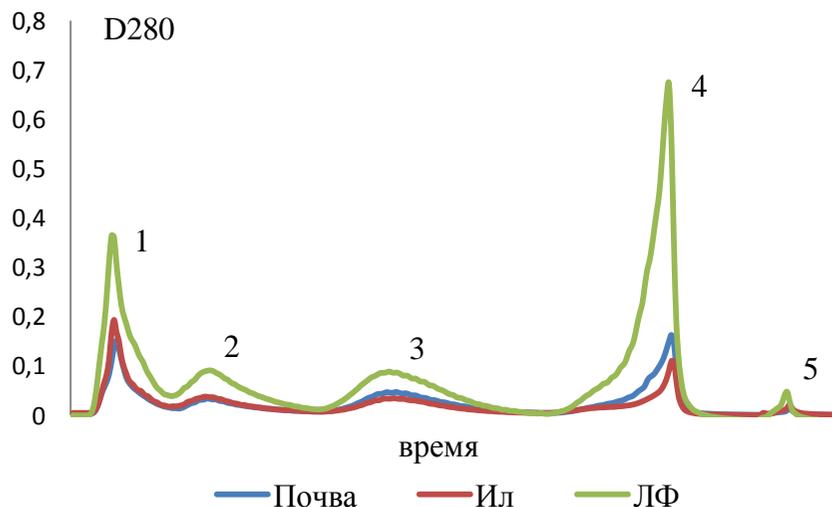


Рис. 1. Хроматографические кривые ГВ почвы, ила и ЛФ чернозема.
Fig. 1. The chromatographic curves of soil, clay and LF of chernozem.

Хроматографические фракции (1, 2, 3, 4 и 5) содержат компоненты ГВ, различающиеся способностью вступать в гидрофобные взаимодействия с матрицей геля (рис. 1).

1-я фракция ГВ содержит гидрофильные соединения, не взаимодействующие с матрицей геля, элюируется с потоком стартового буфера (0.05 М ТРИС-НСl буфер, 2.0 М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, pH 8.0).

2-я фракция ГВ элюируется при негативном градиенте концентрации сульфата аммония.

3-я фракция ГВ элюируется 0.05 М ТРИС-НСl буфером, pH 8.0.

4-я фракция содержит гидрофобные компоненты ГВ, выделяется путем добавления к буферу поверхностно-активного вещества (0.1% додецилсульфат Na).

5-я фракция вымывается щелочным раствором ЭДТА (1.0 н NaOH, 0.001 н ЭДТА, pH 12.0).

Полноту смыва с колонки внесенных в нее ГВ определяли

по величине оптической плотности, а именно по возвращению к исходным значениям (до введения пробы) после выделения последней хроматографической фракции. ГВ в составе первых двух хроматографических фракций относятся к гидрофильным, а последних трех фракций – к гидрофобным.

Результаты сравнивали с данными, полученными для этих же почв ранее. В работе ([Матвеева и др., 2020](#)) определяли гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы чернозема с помощью измерения КУС методом статической сидящей капли ([Ryley, Khoshaim, 1977](#)). Ровную поверхность образца для измерения КУС получали на мембранном фильтре путем осаждения на нем почвенной суспензии и размещения фильтра с осадком на предметном стекле. Для приготовления почвенной суспензии использовали растертые воздушно-сухие образцы почв, просеянные через сито $d = 0.25$ мм. Для гомогенизации водную суспензию образца подвергали воздействию ультразвука (Branson Digital Sonifier 250) с энергией 450 Дж/мл. Концентрация почвенного образца на мембранном фильтре составляла 1.6 мг/см^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 2 представлено распределение гранулоденсиметрических фракций чернозема исследуемых делянок. В виду трудоемкости гранулоденсиметрического фракционирования анализ был проведен на смешанных образцах каждого варианта использования в двухкратной повторности. Поэтому говорить о статистической достоверности количественного содержания фракций мы не можем, однако, можем отметить тенденцию увеличения содержания ЛФ при применении.

Чувствительность ЛФ к системе землепользования объясняется ее составом: наличием легкоразлагаемого ОВ, постоянного источника легкодоступных элементов для растений, и термодинамически устойчивых гумусовых веществ (металлгуминовых комплексных соединений) – источника физиологически активных веществ ([Травникова, 2002](#)).

Таблица 2. Содержание гранулоденсиметрических фракций в слое 0–20 см чернозема разных вариантов использования

Table 2. Content of size-density fractions in a layer of 0–20 cm of chernozem of different use cases

Делянка		Содержание гранулоденсиметрических фракций, %					
		Ил, <1 мкм		ЛФ, <2 г/см ³		Остаток, >2 г/см ³	
		Среднее	Станд. Откл.	Среднее	Станд. Откл.	Среднее	Станд. Откл.
a	К	39.8	0.3	8.9	0.1	50.7	0.4
	Ко	40.0	0.5	9.4	0.1	49.7	0.6
	НПКо	39.2	0.3	10.9	0.1	49.4	0.4
	2НПКо	40.1	0.1	11.9	0.0	48.1	0.1
b	К	40.1	0.4	10.4	0.1	50.3	0.5
	НПК	39.3	0.4	10.4	0.1	49.5	0.5
	2НПК	40.0	0.3	9.9	0.4	50.2	0.2

Легкие фракции (табл. 3) наиболее обогащены углеродом. Содержание в них С (%) в 4.5–5.2 раза больше, чем в илистой фракции. При этом содержание N (%) в ЛФ в 3–3.4 раза превышало долю N в илистой фракции. Помимо общего содержания С и N в почве и в гранулоденсиметрических фракциях важным является соотношение С : N, которое показывает степень обогащенности ОВ азотом. Наиболее обогащено азотом ОВ илистой фракции (9.4–10.8), менее всего – ЛФ (14.2–15.6). Чем меньше соотношение С : N, тем сильнее выражена трансформация ОВ при разложении растительных остатков. При сравнении степени обогащенности азотом гранулоденсиметрических фракций и исходной почвы, отмечается большая минерализация ОВ илистой фракции, по сравнению с ОВ почвы, а также наименьшая степень разложенности ОВ ЛФ. Применение удобрений способствовало повышению соотношения С : N (вариант **а**) в почве, иле и ЛФ. Отмена удобрений (вариант **б**) снизила варьирование этого показателя для почв за счет снижения соотношения С : N во фракции ила и ЛФ.

Изучение качественного состава ОВ чернозема и гранулоденсиметрических фракций, проведенное с помощью жидкостной хроматографии гидрофобного взаимодействия, показало изменение относительного содержания амфифильных компонентов ГВ, экстрагируемых из почв и почвенных фракций. Результаты хроматографического фракционирования щелочных экстракций ГВ из почв, ила и ЛФ представлены в таблице 4.

ГВ ила содержат приблизительно равное количество гидрофильных (1-я и 2-я фракции) и гидрофобных (3-я, 4-я и 5-я фракция) компонентов. ГВ ЛФ содержат в 1.6–2 раза больше гидрофобных соединений, чем гидрофильных. При этом для ГВ почвы в целом соотношение гидрофобных хроматографических фракций к гидрофильным лежало в диапазоне от 1.3 до 1.6, и было обусловлено вкладом ГВ ила и ЛФ.

Изменение относительного содержания хроматографических фракций при разном воздействии на почву свидетельствует о трансформации качественного состава экстрагируемых щелочью ГВ как почв в целом, так и почвенных фракций.

Таблица 3. Содержание углерода и азота в образцах почв и гранулоденсиметрических фракциях чернозема
Table 3. The contents of carbon and nitrogen in samples of soils and size-density fractions of chernozem

Делянка		Почва			Ил, <1 мкм			ЛФ, <2 г/см ³			Остаток, >2 г/см ³		
		С,%	N,%	C/N	С,%	N,%	C/N	С,%	N,%	C/N	С,%	N,%	C/N
а	К	4.27	0.37	11.5	4.81	0.48	10.0	24.78	1.59	15.5	0.64	0.07	8.6
	К ₀	4.56	0.40	11.5	4.50	0.46	9.8	22.93	1.58	14.5	0.63	0.07	9.0
	НПК ₀	4.44	0.38	11.7	4.81	0.50	9.6	21.58	1.48	14.6	0.56	0.06	9.0
	2НПК ₀	4.67	0.39	12.1	4.88	0.52	9.4	21.82	1.46	14.9	0.54	0.07	8.2
б	К	4.35	0.36	12.2	4.74	0.44	10.8	24.23	1.57	15.4	0.71	0.08	9.4
	НПК	4.67	0.38	12.3	4.62	0.43	10.8	24.18	1.55	15.6	0.67	0.07	9.1
	2НПК	4.33	0.35	12.4	4.99	0.48	10.5	23.35	1.64	14.2	0.64	0.07	9.5

Таблица 4. Относительное содержание хроматографических фракций щелочных экстрактов ГВ из почв, ила и ЛФ чернозема. Стандартное отклонение рассчитано по 4 повторностям

Table 4. Relative content of chromatographic fractions of alkaline extracts of HS from soils, clay and LF of chernozem. The standard deviation is calculated for 4 repetitions

		Почва					Ил, <1 мкм					ЛФ, <2 г/см ³				
		Содержание хроматографических фракций, %														
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
а	К	23.4	16.5	28.4	30.9	0.8	31.0	16.4	19.1	31.3	2.2	23.9	14.3	22.0	37.0	2.8
		0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	1.0	1.0	0.0	0.1	0.0
	К ₀	23.0	15.5	29.5	31.2	0.8	31.9	17.9	26.4	22.7	1.0	21.4	13.5	22.5	41.2	1.3
		0.1	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.3	0.1
	NPK ₀	27.2	15.5	22.8	33.3	1.2	38.3	16.3	23.2	21.3	0.9	22.0	12.9	20.4	43.1	1.5
		1.2	1.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.9	1.0	0.2	0.4	0.0
	2NPK ₀	25.0	15.7	26.4	31.9	0.9	32.4	16.6	25.9	24.7	0.5	23.1	13.8	23.2	38.5	1.3
		4.4	1.3	5.1	1.8	0.2	0.4	0.4	0.2	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0
б	К	27.0	16.3	23.3	32.3	1.0	30.8	18.3	23.2	25.8	1.9	19.2	13.5	23.3	42.7	1.3
		1.5	2.2	0.8	1.4	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.0
	NPK	21.4	16.9	26.7	33.8	1.2	29.2	17.6	23.9	28.3	1.0	19.9	15.1	21.5	42.3	1.2
		0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2NPK	26.6	16.3	30.1	26.2	0.8	32.2	16.5	23.1	27.0	1.2	22.9	13.3	19.5	42.2	2.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.3	0.9	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

Примечание. Верхнее значение – среднее по 4 повторностям, нижнее – стандартное отклонение.

По данным таблицы 4 видно, что наиболее стабильной оказалась вторая хроматографическая фракция. Ее содержание в разных вариантах опыта изменялось меньше всего как в ГВ почвы, так и в ГВ ила и ЛФ. При этом в ГВ почвы наиболее сильно выражены изменения в относительном содержании первой и третьей фракции. Анализ хроматографии ГВ ЛФ показывает большие изменения в содержании четвертой фракции – гидрофобной составляющей ГВ. Трансформация ГВ ила прослеживается в изменении относительного содержания всех фракций. Разница во фракционном составе ГВ обусловлена как природой ОВ в почве и в почвенных фракциях, так и внешним воздействием при разной нагрузке на почву исследуемых делянок. Под действием удобрений (**a**) наблюдается относительное увеличение первой хроматографической фракции и одновременное уменьшение доли третьей хроматографической фракции при исследовании почв (табл. 4). ГВ ила показали меньшее изменение доли второй хроматографической фракции при варьировании содержания первой. Наиболее постоянным было относительное содержание гидрофильных компонентов ГВ ЛФ. Вариант последствия удобрений (**b**) при хроматографическом фракционировании ГВ почв показал обратную картину – при увеличении доли второй хроматографической фракции уменьшалась первая. Относительное содержание гидрофильных фракций ГВ ила и ЛФ было выражено слабее, чем для почвы в целом.

Для оценки происходящих изменений в ГВ почв и почвенных фракций и сравнения вариантов опыта друг с другом нами была рассчитана степень гидрофильности ГВ почв, ила и ЛФ. Отношение наиболее гидрофильной хроматографической фракции к наиболее гидрофобной, т. е. 1 и 4 пиков хроматографической кривой. Чем выше это соотношение, тем больше выражена гидрофильность компонентов ГВ ([Милановский и др., 2005](#); [Дымов и др., 2015](#)). Соотношение первой и четвертой хроматографической фракции для разных вариантов использования чернозема представлено на рисунке 3.

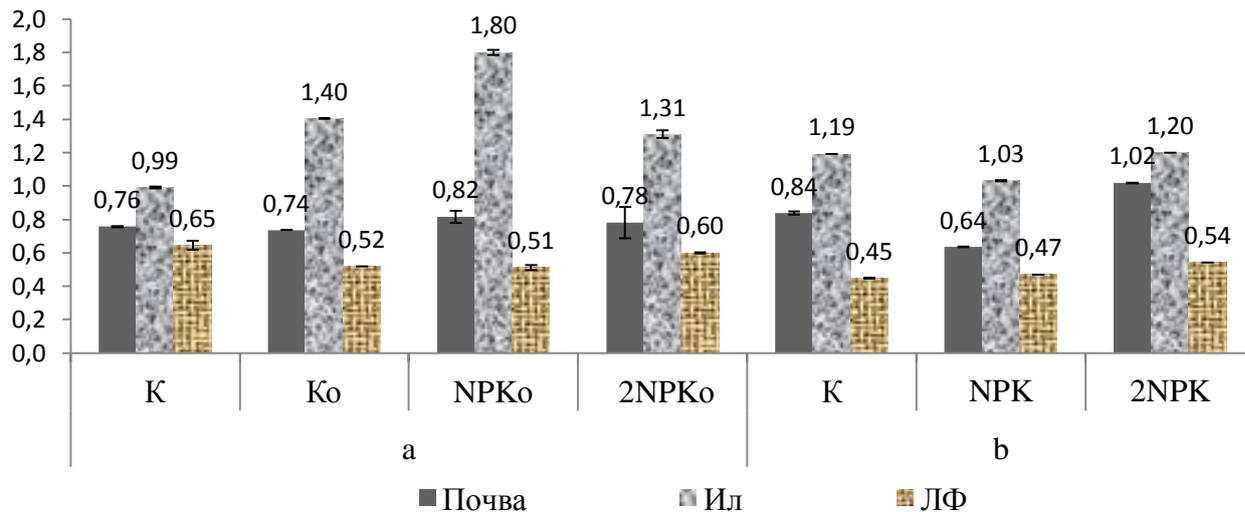


Рис. 3. Степень гидрофильности ГВ чернозема при различных вариантах использования. **а** – действие удобрений, **б** – последствие удобрений; **о** – последствие орошения.

Fig. 3. Degree of hydrophilicity of chernozem soil in different use cases. **a** – the effect of fertilizers, **b** – the aftereffect of fertilizers; **o** – irrigation aftereffect.

При одинаковой направленности изменения степени гидрофильности ГВ как почв, так и почвенных фракций интенсивность изменений различна (рис. 3). Так ГВ почв контрольных участков варианта действия удобрений (**а**) значительно не отличались по степени гидрофильности. ГВ ила контроля без орошения (К) содержали равное количество наиболее гидрофильных (1-я фракция) и наиболее гидрофобных (4-я фракция) компонентов. В то время как ГВ ила орошаемого контроля (Ко) имели меньшее содержание гидрофобных компонентов (доля 4-й фракции составила 22.8%), что увеличило степень гидрофильности ГВ ила делянки Ко более чем на 40% по сравнению с этим же показателем для ГВ ила делянки К. Степень гидрофильности ГВ ЛФ делянки Ко, напротив, на 20% оказалась ниже, чем на делянке К. Если сравнивать делянки последствия орошения с применением одной дозы минеральных удобрений с контролем, то тут уже для каждого из вариантов гидрофобных компонентов ГВ ЛФ было в два раза больше, чем гидрофильных. Степень гидрофильности ГВ ЛФ делянок Ко и НРКо составила – 0.51–0.52 соответственно. При этом для ГВ почвы доля первой хроматографической фракции увеличилась с 23.1 до 28.1% при изменении доли четвертой фракции с 31.4 до 33.3 (табл. 4), что привело к увеличению степени гидрофильности на 10% (рис. 2). Изменение гидрофобно-гидрофильного состава почвы данного варианта опыта обусловлено в большей мере трансформацией ГВ илистой фракции, степень гидрофильности которой увеличилась на 28.5%, а также увеличением содержания ЛФ в почве. ГВ чернозема с внесением 2 доз минеральных удобрений показали более сложное распределение гидрофобно-гидрофильных компонентов в ГВ гранулоденсиметрических фракций. Так степень гидрофильности ГВ исходной почвы делянки 2НРКо значительно не отличалась от степени гидрофильности ГВ почв других делянок действия удобрений (**а**). Отношение доли наиболее гидрофильной фракции к доле наиболее гидрофобной находилось в диапазоне от 0.74 до 0.82.

При этом степень гидрофильности ГВ ЛФ увеличилась на 15.4% и приблизилась к этому показателю, определенному для делянки контроля без орошения (К), в то время как степень гид-

рофильности ГВ илистой фракции была ниже на 28% по сравнению с делянкой применения одной дозы удобрений (НРКо).

Как видно по рисунку 2, изменение гидрофильности ГВ почв в целом между делянкой контроля Ко и делянкой применения одной дозы удобрений НРКо определялось изменением соотношения гидрофильных и гидрофобных компонентов в ГВ ила. А при сравнении контрольного участка Ко с участком применения двойной дозы удобрений 2НРКо больший вклад вносят ГВ ЛВ, что может быть обусловлено как изменением состава поступающего свежего ОВ, так и увеличением количества ЛФ при большей продуктивности культур севооборота при использовании повышенных доз удобрений.

Если вариант действия удобрений (**а**) показывает значительное варьирование в соотношении гидрофильной и гидрофобной фракции ГВ ила и ЛФ при меньшем изменении этого показателя для ГВ почвы в целом, то на участке последствия удобрений (**б**) была выявлена обратная картина. Степень гидрофильности ГВ ила контрольной делянки (К) и делянки прекращения внесения двойной дозы удобрений (2НРК) находится на одном уровне – наиболее гидрофильной фракции ГВ было на 20% больше, чем наиболее гидрофобной. При этом анализ ГВ ила делянки последствия одной дозы удобрений (НРК) показал равное содержание гидрофильных и гидрофобных компонентов. ГВ ЛФ, напротив, не показали различий в соотношении 1-й и 4-й хроматографической фракции между делянками контроля (К) и НРК. А для делянки 2НРК было выявлено увеличение доли гидрофильной фракции с 19.1 до 22.9%. Также можно отметить, что степень гидрофильности ГВ ила изменялась за счет изменения доли наиболее гидрофобных компонентов при постоянстве доли наиболее гидрофильных, в то время как в ГВ ЛФ изменялась доля наиболее гидрофильных компонентов при постоянстве наиболее гидрофобных (табл. 4). Суммарный вклад ГВ почвенных фракций в гидрофобно-гидрофильный состав ГВ почв привел к снижению степени гидрофильности ГВ на делянке НРК и ее увеличению на делянке 2НРК.

Нельзя не отметить различия в динамике изменения гидрофобно-гидрофильных свойств ГВ почв и почвенных фракций ва-

риантов действия и последействия удобрений (рис. 2а, б). Если в первом варианте изменения в свойствах почв менее заметны, в то время как для почвенных фракций различия очевидны, то исследование участка последействия удобрений показывает обратную картину. Из чего можно сделать вывод, что отмена применения удобрений при сохранении действующего севооборота является стрессом для почвы, т. к. изменения качественного состава ГВ можно наблюдать уже на образцах исходных почв, а не в ГВ гранулоденсиметрических фракций.

В более ранней работе ([Матвеева и др., 2020](#)) гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы этих же почв определялись путем измерения краевого угла смачивания (КУС) методом сидячей капли на мембранных фильтрах (рис. 4). Для каждого исследуемого образца подготовлено по 2 мембранных фильтра, число измерений КУС на одном фильтре – 6, образцов на делянке 3–5.

Как и при определении гидрофобно-гидрофильных свойств ГВ с помощью хроматографии гидрофобного взаимодействия, направленность изменения изучаемых показателей для варианта действия удобрений и варианта последействия удобрений совпала (рис. 3 и рис. 4).

Увеличение гидрофобности поверхности твердой фазы почв отражается в увеличении КУС и было выявлено в варианте применения удобрений (**а**). Смачиваемость поверхности твердой фазы почв варианта последействия удобрений (**б**) не показала значимых отличий для чернозема с 1 и 2 дозами NPK. Таким образом, результаты показывают увеличение гидрофобности поверхности твердой фазы почв при одновременном увеличении гидрофильности ГВ как почв, так и ила, и ЛФ. Как уже отмечалось ранее, гидрофобные компоненты ГВ предохраняют гидрофильные от микробной минерализации, а также выноса с водой вниз по почвенному профилю. Поэтому соотношение гидрофобных и гидрофильных компонентов ГВ может указывать на наличие или отсутствие деградационных процессов в почве.

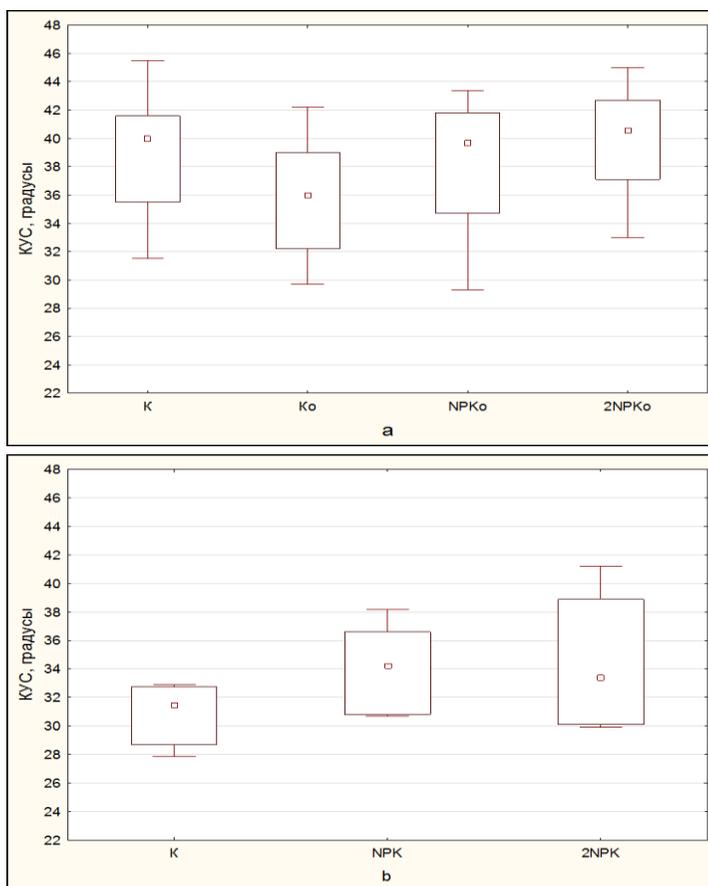


Рис. 4. Краевой угол смачивания чернозема. **a** – действие удобрений, **b** – последствие удобрений. К – контроль, NPK и 2NPK – одна и две дозы вносимых минеральных удобрений соответственно, **o** – последствие орошения. Размах обусловлен пространственным варьированием.

Fig. 4. Contact angle of the studied soils of chernozem. **a** – effect of fertilizers, **b** – aftereffect of fertilizers. K – control, NPK and 2NPK – one and two doses of mineral fertilizers, respectively; **o** – irrigation aftereffect. The spread is due to spatial variation.

Результаты корреляционного анализа между гидрофобно-гидрофильными свойствами поверхности твердой фазы чернозема, определенными путем измерения КУС, и гидрофобно-гидрофильными свойствами ГВ исходной почвы и почвенных гранулоденсиметрических фракций представлены в таблице 5.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между величиной КУС и отношением 1-го и 4-го пиков хроматограмм ГВ чернозема, ила и ЛФ

Table 5. Correlation coefficients between CA and the ratio of 1/4 peaks of chromatograms of HS of chernozem, CF and LF

Группировка вариантов опыта	Число делянок	Почва	Ил	ЛФ
Все варианты	7	-0.03	0.22	0.87
Действие удобрений	4	0.53	-0.44	0.79
Действие удобрений Последствие орошения	3	0.85	-0.22	0.91
Последствие удобрений	3	0.13	-0.29	0.80

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Коэффициенты корреляции рассчитывали между средними значениями величин для каждой делянки, при этом среднее значение КУС рассчитывали по 36–60 измерениям для каждой делянки, а степень гидрофильности – по 4 повторностям.

Чем выше соотношение 1-го пика к 4-му, тем больше выражена гидрофильность ГВ. Положительная корреляция между величиной КУС и этим соотношением указывает на то, что увеличение гидрофобности поверхности твердой фазы почв происходит одновременно с увеличением доли гидрофильных компонентов в составе ГВ почв или почвенных фракций. Как видно из таблицы 5, положительная корреляция между исследуемыми показателями отмечается в варианте действия удобрений при анализе ГВ почв и ЛФ, в варианте последствия удобрений положительная корреляция между гидрофобностью поверхности твердой фазы почв и гидрофильностью ГВ наблюдается только для ЛФ. Кроме того, увеличение гидрофильности ГВ как исходной почвы, так и поч-

венных фракций происходит с увеличением содержания углерода как в почве, так и во фракциях, что свидетельствует об устойчивости системы. Разный отклик ГВ ила и ЛФ обусловлен особенностями их строения, а именно органо-минеральным взаимодействием, которое и определяет скорость их трансформации и отклика на изменения внешних условий.

Как показало наше исследование, с помощью анализа гидрофобного-гидрофильного состава ГВ почвенных фракций можно раньше обнаружить происходящие с ОВ изменения, по сравнению с изучением ОВ, выделенного из почвы в целом. Поэтому для контроля и предотвращения деграционных изменений почв рекомендуется проводить мониторинг гидрофобно-гидрофильного состава ОВ гранулоденсиметрических фракций почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов свидетельствует, что гидрофобно-гидрофильные свойства ГВ чернозема могут служить маркером происходящих в почве процессов, в том числе деграционных, при агрогенной нагрузке. Помимо вида нагрузки значимую роль играет ее интенсивность либо отмена. Применение минеральных удобрений способствует повышению поступления растительных остатков, корневых выделений и микробиологической активности, что проявляется в увеличении содержания углерода в почве, и приводит к увеличению гидрофобности поверхности твердой фазы почв. Одновременно с повышением гидрофобности поверхности твердой фазы происходит увеличение степени гидрофильности ГВ как почв, так и выделенных гранулоденсиметрических фракций. Относительное накопление гидрофильных компонентов в составе ГВ при одновременном увеличении гидрофобности поверхности твердой фазы почвы свидетельствует об устойчивости почвы в целом. ГВ почвенных фракций интенсивнее реагировали на агрогенную нагрузку в виде применения минеральных удобрений или их отмены, чем сама почва, поэтому изучение гидрофобно-гидрофильных ГВ различных по характеру органо-минеральных взаимодействий следует использовать при мониторинге изменений сельскохозяйственных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адамсон А., Абидор И.Г., Дерягин Б.В.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
2. *Басов Г.Ф., Грищенко М.Н.* Гидрологическая роль лесных полос (по данным исследований, проведенных в Каменной Степи). М.: Гослесбумиздат, 1963. 201 с.
3. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н., Жангуров Е.В., Низовцев Н.А.* Влияние пожара в северотаежном ельнике на органическое вещество почвы // Лесоведение. 2015. № 1. С. 52–62.
4. *Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М., Розов Н.И.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Рипол Классик, 1977. 221 с.
5. *Когут Б.М., Шульц Э., Титова Н.А., Холодов В.А.* Органическое вещество гранулоденсиметрических фракций целинного и пахотного типичного чернозема // Агрехимия. 2010. № 8. С. 3–9.
6. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 77–102. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-77-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-77-102).
7. *Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Рогова О.Б.* Краевой угол смачивания как интегральный показатель физико-химических свойств черноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 76–123. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-76-123](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-76-123).
8. *Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Рогова О.Б.* Изменение гидрофобно-гидрофильных свойств органического вещества черноземов Каменной Степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 106. С. 49–76. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-106-49-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-106-49-76).
9. *Милановский Е.Ю.* Амфифильные компоненты гумусовых веществ почв // Почвоведение. 2000. № 6. С. 706–715.
10. *Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Русанов А.М., Засыпкина Д.И., Николаева Е.И., Анилова Л.В.* Почвенная структура и органическое вещество типичных черноземов Предуралья под лесом и многолетней пашней // Вестник Оренбургского государственного университета. 2005. № 2. С. 113–117.
11. *Травникова Л.С.* Закономерности гумусонакопления: новые данные и их интерпретация // Почвоведение. 2002. № 7. С. 832–843.

12. *Шаймухаметов М.Ш., Титова Н.А., Травникова Л.С.* Применение физических методов фракционирования для характеристики органического вещества почв // Почвоведение. 1984. № 8. С. 131–141.
13. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
14. *Bahrani B., Mansell R.S., Hammond L.C.* Using infiltrations of heptane and water into soil columns to determine soil-water contact angles // Soil Science Society of America Journal. 1973. Vol. 37(4). P. 532–534.
15. *Baldock J.A., Beare M.H., Curtin D., Hawke B.* Stocks, composition and vulnerability to loss of soil organic carbon predicted using mid-infrared spectroscopy // Soil Research. 2018. Vol. 56(5). P. 468–480.
16. *Benard P., Zarebanadkouki M., Hedwig C., Holz M., Ahmed M., Carminati A.* Pore-scale distribution of mucilage affecting water repellency in the rhizosphere // Vadose Zone Journal. 2018. Vol. 17(1). P 1–9.
17. *Bughici T., Wallach R.* Formation of soil–water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern // Geoderma. 2016. Vol. 262. P. 1–11.
18. *Chen H., Rhoades C.C., Chow A.T.* Characteristics of soil organic matter 14 years after a wildfire: A pyrolysis-gas-chromatography mass spectrometry (Py-GC-MS) study // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2020. Vol. 152. P. 1–8.
19. *Cihlář Z., Vojtová L., Conte P., Nasir S., Kučerik J.* Hydration and water holding properties of cross-linked lignite humic acids // Geoderma. 2014. Vol. 230. P. 151–160.
20. *Daniel N.R., Uddin S.M., Harper R.J., Henry D.J.* Soil water repellency: A molecular-level perspective of a global environmental phenomenon // Geoderma. 2019. Vol. 338. P. 56–66.
21. *Dersch G., Böhm K.* Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2001. Vol. 60(1). P. 49–55.
22. *Doerr S.H.* On standardizing the ‘water drop penetration time’ and the ‘molarity of an ethanol droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils // Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group. 1998. Vol. 23(7). P. 663–668.
23. *Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D.* Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance // Earth-Science Reviews. 2000. Vol. 51(1–4). P. 33–65.
24. *Drahorad S.L., Jehn F.U., Ellerbrock R.H., Siemens J., Felix-Henningsen P.* Soil organic matter content and its aliphatic character define the

hydrophobicity of biocrusts in different successional stages // *Ecohydrology*. 2020. Vol. 13(6). P. 1–8.

25. *Ellerbrock R.H., Gerke H.H., Bachmann J., Goebel M.O.* Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2005. Vol. 69(1). P. 57–66.

26. *Fidanza M., Kostka S., Bigelow C.* Communication of soil water repellency causes, problems, and solutions of intensively managed amenity turf from 2000 to 2020 // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2020. Vol. 68(4). P. 306–312.

27. *Glqb T., Gondek K.* The influence of soil compaction and N fertilization on physico-chemical properties of Mollic Fluvisol soil under red clover/grass mixture // *Geoderma*. 2014. Vol. 226. P. 204–212.

28. *Hai L., Li X.G., Li F.M., Suo D.R., Guggenberger G.* Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under a wheat–wheat–maize cropping system in an arid region of China // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42(2). P. 253–259.

29. *Hao X., Liu S., Wu J., Hu R., Tong C., Su Y.* Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2010. Vol. 81(1). P. 17–24.

30. *Kaur T., Brar B., Dhillon N.* Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize–wheat cropping system // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2008. Vol. 81(1). P. 59–69.

31. *Liu Z., Yu X., Wan L.* Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11(1). P. 21–35.

32. *Mao J., Nierop K.G.J., Sinninghe Damsté J.S., Dekker S.C.* Roots induce stronger soil water repellency than leaf waxes // *Geoderma*. 2014. 232–234. P. 328–340

33. *Mao J., Nierop K.G., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B.* Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review // *Journal of Soils and Sediments*. 2019. Vol. 19(1). P. 171–185.

34. *Menšík L., Hlišnikovský L., Pospíšilová L., Kunzová E.* The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment // *Journal of soils and sediments*. 2018. Vol. 18(8). P. 2813–2822.

35. *Miller J., Owen M., Yang X., Drury C., Reynolds W., Chanasyk D.* Long-term cropping and fertilization influences soil organic carbon, soil water repellency, and soil hydrophobicity // *Canadian Journal of Soil Science*. 2020. Vol. 100(3). P. 234–244.

36. Müller K., Deurer M. Review of the remediation strategies for soil water repellency // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011. Vol. 144(1). P. 208–221.
37. Ogunmokun F.A., Liu Z., Wallach R. The influence of surfactant-application method on the effectiveness of water-repellent soil remediation // *Geoderma*. 2020. Vol. 362. P. 1–12.
38. Oostindie K., Dekker L., Wesseling J., Ritsema C., Moore D. Influence of a single soil surfactant application on potato ridge moisture dynamics and crop yield in a water repellent Sandy soil. Proc. XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 938. 2010. P. 341–346.
39. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kühnel A., Macdonald L.M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M-L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 125. P. 10–26.
40. Roper M., Ward P., Keulen A., Hill J. Under no-tillage and stubble retention, soil water content and crop growth are poorly related to soil water repellency // *Soil and Tillage Research*. 2013. Vol. 126. P. 143–150.
41. Ryley D.J., Khoshaim B.H. New method of determining contact-angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact-angle) // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1977. Vol. 59(2). P. 243–251.
42. Šimon T., Czako A. Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties // *Plant, Soil and Environment*. 2014. Vol. 60(7). P. 314–319.
43. Su Y.-Z., Wang F., Suo D.-R., Zhang Z.-H., Du M.-W. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat–wheat–maize cropping system in northwest China // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2016. Vol. 75(1). P. 285–295.
44. Tadayonnejad M., Ghorbani Dashtaki S., Mosadeghil M.R., Mohammadi J., Panahi M. The effect of long-term drip irrigation and polyacrylamide application on soil water repellency in the quince orchard garden // *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 2017. Vol. 7(2). P. 85–102.
45. Wang H., Xu J., Liu X., Zhang D., Li L., Li W., Sheng L. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 195. P. 1–9.
46. Wei W., Yan Y., Cao J., Christie P., Zhang F., Fan M. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil

organic matter: an integrated analysis of long-term experiments // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016. Vol. 225. P. 86–92.

47. *World Reference Base for soil resources 2014*: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Report (106).

48. *Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu.* From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // *Eurasian soil science*. 2018. Vol. 51. Iss. 11. P. 1326–1347.

49. *Zimmermann M., Leifeld J. Schmidt M., Smith P., Fuhrer J.* Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model // *European Journal of Soil Science*. 2007. Vol. 58(3). P. 658–667.

REFERENCES

1. Adamson A., Abidor I.G., Deryagin B.V., *Fizicheskaya khimiya poverkhnosti* (Physical chemistry of surfaces), Moscow: Mir, 1979, 568 p.

2. Basov G.F., Grishchenko M.N., *Gidrologicheskaya rol' lesnyh polos (po dannym issledovaniy, provedennyh v Kamennoj stepi)* (Hydrological role of forest belts (according to research carried out in the Stone Steppe)), Moscow: Goslesbumizdat, 1963, 201 p.

3. Dymov A.A., Dubrovskij Yu.A., Gabov D.N., ZHangurov E.V., Nizovcev N.A., Vliyanie pozhara v severotaeznom el'nike na organicheskoe veshchestvo pochvy (Effects of fire in northern taiga spruce forest on soil organic matter), *Lesovedenie*, 2015, No. 1, pp. 52–62.

4. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., Rozov N.I., *Klassifikaciya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnosis of soils of the USSR), Moscow: Ripol Klassik, 1977, 221 p.

5. Kogut B.M., SHul'c E., Titova N.A., Holodov V.A., Organicheskoe veshchestvo granulodensimetriceskih frakcij celinnogo i pahotnogo tipichnogo chernozema (Organic matter of granulodensimetric fractions of virgin and arable typical chernozem), *Agrohimiya*, 2010, No. 8, pp. 3–9.

6. Lebedeva I.I., Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., The experience of the complex assessment of the impact of the length of agricultural use on properties and regimes of agrochernozems of the Stone Steppe agrochernozems of the Stone Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 77–102, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-83-77-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-77-102).

7. Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu., Khaidapova D.D., Rogova O.B., The contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical properties of Chernozems of Kamennaya Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 76–123, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-76-123](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-76-123).

8. Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu., Rogova O.B., Changes in the hydrophobic-hydrophilic properties of the organic matter of the chernozems of the Kamennaya Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 106, pp. 49–76, DOI: [10.19047/0136-1694-2021-106-49-76](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-106-49-76).
9. Milanovskij E.Yu., Amfifil'nye komponenty gumusovyh veshchestv pochv (Amphiphilic components of humus substances of soils), *Pochvovedenie*, 2000, Iss. 6, pp. 706–715.
10. Milanovskij E.Yu., Shein E.V., Rusanov A.M., Zasyapkina D.I., Nikolaeva, E.I., Anilova L.V., Pochvennaya struktura i organicheskoe veshchestvo tipichnyh chernozemo Predural'ya pod lesom i mnogoletnej pashnej (Soil structure and organic matter of typical chernozems of the Urals under forest and perennial arable land. Humus substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, Vol. 2, pp. 113–117.
11. Travnikova L.S., Zakonomernosti gumusonakopleniya: novye dannye i ih interpretaciya (Regularities of humus accumulation: new data and their interpretation), *Pochvovedenie*, 2002, No. 7, pp. 832–843.
12. Shajmuhametov M.Sh., Titova N.A., Travnikova L.S., Primenenie fizicheskikh metodov frakcionirovaniya dlya harakteristiki organicheskogo veshchestva pochv (Application of physical fractionation methods to characterize soil organic matter), *Pochvovedenie*, 1984, Vol. 8, pp. 131–141.
13. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnosis of soils in Russia), Smolensk: Ojkumena, 2004, 341 p.
14. Bahrani B., Mansell R.S., Hammond L.C., Using infiltrations of heptane and water into soil columns to determine soil-water contact angles, *Soil Science Society of America Journal*, 1973, Vol. 37(4), pp. 532–534.
15. Baldock J.A., Beare M.H., Curtin D., Hawke B., Stocks, composition and vulnerability to loss of soil organic carbon predicted using mid-infrared spectroscopy, *Soil Research*, 2018, Vol. 56(5), pp. 468–480.
16. Benard P., Zarebanadkouki M., Hedwig C., Holz M., Ahmed M., Carminati A., Pore-scale distribution of mucilage affecting water repellency in the rhizosphere, *Vadose Zone Journal*, 2018, Vol. 17(1), pp 1–9.
17. Bughici T., Wallach R., Formation of soil–water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern, *Geoderma*, 2016, Vol. 262, pp. 1–11.
18. Chen H., Rhoades C.C., Chow A.T., Characteristics of soil organic matter 14 years after a wildfire: A pyrolysis-gas-chromatography mass spectrometry (Py-GC-MS) study, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020, Vol. 152, pp. 1–8.

19. Cihlář Z., Vojtová L., Conte P., Nasir S., Kučerík J., Hydration and water holding properties of cross-linked lignite humic acids, *Geoderma*, 2014, Vol. 230, pp. 151–160.
20. Daniel N.R., Uddin S.M., Harper R.J., Henry D.J., Soil water repellency: A molecular-level perspective of a global environmental phenomenon, *Geoderma*, 2019, Vol. 338, pp. 56–66.
21. Dersch G., Böhm K., Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, Vol. 60(1), pp. 49–55.
22. Doerr S.H., On standardizing the ‘water drop penetration time’ and the ‘molarity of an ethanol droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils, *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 1998, Vol. 23(7), pp. 663–668.
23. Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance, *Earth Science Reviews*, 2000, Vol. 51(1–4), pp. 33–65.
24. Drahorad S.L., Jehn F.U., Ellerbrock R.H., Siemens J., Felix-Henningsen P., Soil organic matter content and its aliphatic character define the hydrophobicity of biocrusts in different successional stages, *Ecohydrology*, 2020, Vol. 13(6), pp. 1–8.
25. Ellerbrock R.H., Gerke H.H., Bachmann J., Goebel M.O., Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2005, Vol. 69(1), pp. 57–66.
26. Fidanza M., Kostka S., Bigelow C., Communication of soil water repellency causes, problems, and solutions of intensively managed amenity turf from 2000 to 2020, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Vol. 68(4), pp. 306–312.
27. Głąb T., Gondek K., The influence of soil compaction and N fertilization on physico-chemical properties of Mollic Fluvisol soil under red clover/grass mixture, *Geoderma*, 2014, Vol. 226, pp. 204–212.
28. Hai L., Li X.G., Li F.M., Suo D.R., Guggenberger G., Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under a wheat–wheat–maize cropping system in an arid region of China, *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, Vol. 42(2), pp. 253–259.
29. Hao X., Liu S., Wu J., Hu R., Tong C., Su Y., Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, Vol. 81(1), pp. 17–24.

30. Kaur T., Brar B., Dhillon N., Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize–wheat cropping system, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, Vol. 81(1), pp. 59–69.
31. Liu Z., Yu X., Wan L., Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils, *Acta Geotechnica*, 2016, Vol. 11(1), pp. 21–35.
32. Mao J., Nierop K.G.J., Sinninghe Damsté J.S., Dekker S.C., Roots induce stronger soil water repellency than leaf waxes, *Geoderma*, 2014, Vol. 232–234, pp. 328–340.
33. Mao J., Nierop K.G., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B., Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review, *Journal of Soils and Sediments*, 2019, Vol. 19(1), pp. 171–185.
34. Menšík L., Hlisnikovský L., Pospíšilová L., Kunzová E., The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment, *Journal of soils and sediments*, 2018, Vol. 18(8), pp. 2813–2822.
35. Miller J., Owen M., Yang X., Drury C., Reynolds W., Chanasyk D., Long-term cropping and fertilization influences soil organic carbon, soil water repellency, and soil hydrophobicity, *Canadian Journal of Soil Science*, 2020, Vol. 100(3), pp. 234–244.
36. Müller K., Deurer M., Review of the remediation strategies for soil water repellency, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, Vol. 144(1), pp. 208–221.
37. Ogunmokun F.A., Liu Z., Wallach R., The influence of surfactant-application method on the effectiveness of water-repellent soil remediation, *Geoderma*, 2020, Vol. 362, pp. 1–12.
38. Oostindie K., Dekker L., Wesseling J., Ritsema C., Moore D., Influence of a single soil surfactant application on potato ridge moisture dynamics and crop yield in a water repellent Sandy soil, *Proc. XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 938*, 2010, pp. 341–346.
39. Poelplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuz'yakov Y., Kühnel A., Macdonald L.M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M-L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26.
40. Roper M., Ward P., Keulen A., Hill J., Under no-tillage and stubble retention, soil water content and crop growth are poorly related to soil water repellency, *Soil and Tillage Research*, 2013, Vol. 126, pp. 143–150.

41. Ryley D.J., Khoshaim B.H., New method of determining contact-angle made by a sessile drop upon a horizontal surface (sessile drop contact-angle), *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, Vol. 59(2), pp. 243–251.
42. Šimon T., Czako A., Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties, *Plant, Soil and Environment*, 2014, Vol. 60(7), pp. 314–319.
43. Su Y.-Z., Wang F., Suo D.-R., Zhang Z.-H., Du M.-W., Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat–wheat–maize cropping system in northwest China, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, Vol. 75(1), pp. 285–295.
44. Tadayonnejad M., Ghorbani Dashtaki S., Mosadeghi M.R., Mohammadi J., Panahi M., The effect of long-term drip irrigation and polyacrylamide application on soil water repellency in the quince orchard garden, *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2017, Vol. 7(2), pp. 85–102.
45. Wang H., Xu J., Liu X., Zhang D., Li L., Li W., Sheng L., Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China, *Soil and Tillage Research*, 2019, Vol. 195, pp. 1–9.
46. Wei W., Yan Y., Cao J., Christie P., Zhang F., Fan M., Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: an integrated analysis of long-term experiments, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, Vol. 225, pp. 86–92.
47. *World Reference Base for soil resources 2014*: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Report (106).
48. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, Iss. 11, pp. 1326–1347.
49. Zimmermann M., Leifeld J., Schmidt M., Smith P., Fuhrer J. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model, *European Journal of Soil Science*, 2007, Vol. 58(3), pp. 658–667.