

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-49-76



Ссылки для цитирования:

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

Cite this article as:

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, V. 106, pp. 49-76, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-49-76

Благодарность:

Работа выполнена по темам НИР “0591-2019-0024. Разработать критерии оценки рисков деградации почв” и “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the research projects “0591-2019-0024. Developing criteria for assessment of soil degradation risks” and “Physical basis of ecological functions of soils: technologies for monitoring, prognosis and management”.

Изменение гидрофобно-гидрофильных свойств органического вещества черноземов Каменной Степи

© 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 18.01.2021, после доработки 20.02.2021,
принята к публикации 15.03.2021

Резюме: Исследовали образцы почв и выделенные из них физические гранулоденсиметрические фракции (илистую с размером частиц менее 1 мкм, легкую (ЛФ) с плотностью менее 2 г/см³ и фракцию остатка)

чернозема обыкновенного трех контрастных вариантов опытных полей агроландшафта Каменная Степь Воронежской области: косимой степи, длительного бессменного черного пара и бессменной кукурузы, – основные отличия которых заключаются в обработке (пашня и ее отсутствие) и поступлении/отсутствию растительных остатков и корневых выделений. Содержание ЛФ изменяется в ряду: “косимая степь” > “бессменная кукуруза” > “бессменный черный пар”, – что соответствует направленности изменения содержания общего углерода почвы и снижению величины краевого угла смачивания (КУС) поверхности твердой фазы исследуемых черноземов. Определение содержания общего С и N выявило изменение качественного и количественного состава гранулоденсиметрических фракций при разных вариантах использования. Хроматографическое фракционирование щелочных экстракций гумусовых веществ (ГВ) образцов чернозема и выделенных гранулоденсиметрических фракций позволило выявить повышение степени гидрофильности ГВ при одновременном увеличении гидрофобности поверхности твердой фазы и содержания углерода в почве. ГВ ЛФ “косимой степи” оказались на 63% более гидрофильными по сравнению с ГВ ЛФ “бессменного черного пара” и на 47% – по сравнению с ГВ ЛФ “бессменной кукурузы”. В то время как гидрофильность ГВ ила отличалась на 16 и 27% соответственно. Гидрофильность ГВ исходной почвы на делянке “косимой степи” была на 41% выше гидрофильности ГВ в почве на делянке “бессменного черного пара” и на 24% выше, чем в почве делянки “бессменной кукурузы”. Изменения гидрофильности ГВ гранулоденсиметрических фракций проявляются интенсивнее, чем ГВ почвы. На этом основании изменение степени гидрофильности ГВ гранулоденсиметрических фракций можно считать индикатором деградации почв при различной агрогенной нагрузке.

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

Changes in the hydrophobic-hydrophilic properties of the organic matter of the chernozems of the Kamennaya Steppe

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 18.01.2021, Revised 20.02.2021, Accepted 15.03.2021

Abstract: Soil samples and physical size-density 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 residue) of ordinary chernozem were studied in three contrasting variants of the experimental fields of the Kamennaya Steppe agrolandscape of the Voronezh region: mowed steppe, long-term permanent bare fallow and permanent corn – the main differences of which are in tillage (cultivated and not cultivated lands) and in the supply/absence of plant residues and root secretions. The LF content changes in the series: “mowed steppe” > “permanent corn” > “permanent bare fallow”, which corresponds to the direction of changes in the total carbon content of the soil and a decrease in the value of the contact angle of wetting (CA) of the surface of the solid phase of the studied chernozems. The determination of the total C and N content revealed the change in the qualitative and quantitative composition of the size-density fractions for different land use cases. Chromatographic fractionation of alkaline extractions of humus substances (HS) of chernozem samples and size-density fractions revealed an increase in the degree of hydrophilicity of HS while simultaneously increasing the hydrophobicity of the solid phase surface and the carbon content in the soil. HS of LF of the “mowed steppe” turned out to be by 63% more hydrophilic than HS of LF of “permanent bare fallow” and by 47% more hydrophilic than HS of LF of “permanent corn”. While the hydrophilicity of the HS silt differed by 16 and 27%, respectively. The hydrophilicity of the HS of the original soil in the plot of the “mowed steppe” was by 41% higher than the hydrophilicity of the HS in the soil in the plot of “permanent bare fallow” and by 24% higher than in the soil of the plot of “permanent corn”. In addition, changes in the hydrophilicity of HS of size-density fractions are more intense than the HS of the soil, so the change in the degree of hydrophilicity of HS of size-density fractions is an indicator of soil degradation under different agrogenic pressure.

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

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственное использование земель непременно

приводит к изменению их свойств. Замена естественной растительности, механическая обработка почвы в совокупности с применением минеральных удобрений и орошением приводит к деградации земель. Поддержание свойств почв на оптимальном уровне, как для выращивания сельскохозяйственной продукции, так и для сохранения экологических функций почв, является важной задачей. В настоящее время уделяется большое внимание изучению изменений свойств поверхности твердой фазы почв при различной антропогенной нагрузке ([Capriel, 1997](#); [Šimon et al., 2009](#); [Diamantis et al., 2013](#)), поскольку они определяют поведение воды в почве. Одним из индикаторов устойчивости почвенной структуры считают соотношение гидрофобных и гидрофильных компонентов твердой фазы почв ([Shakesby et al., 2000](#); [Милановский, 2009](#)). Использование этого показателя базируется на особенностях формирования и трансформации органического вещества (ОВ) в процессе изменения природных условий почвообразования на определенной территории (например, смены растительности, изменения климатических условий), либо при изменении внешнего воздействия на почву, например, при изменении интенсивности и направленности сельскохозяйственного использования. Таким образом, гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы почв могут определять устойчивость почвенной структуры и служить интегральным показателем физико-химических свойств почв ([Kraemer et al., 2019](#); [Bachmann et al., 2020](#); [Матвеева и др., 2020](#)).

Целью настоящей работы было изучение амфифильности ГВ чернозема природно-антропогенного ландшафта Каменная Степь. Несмотря на то, что изучению изменения гумусного состояния почв этого района посвящено большое количество работ ([Кононова, Бельчикова, 1953](#); [Адерихин, Богатырева, 1974](#)), в том числе и в последние годы ([Зборищук, 2007](#); [Когут и др., 2009](#); [Червердин, Беспалов, 2011](#); [Лебедева и др., 2016](#); [Беспалов и др., 2018](#); [Мамонтов, Соколовская, 2018](#)), в большинстве из них анализируется общее содержание ОВ, а также соотношение $C_{гк} : C_{фк}$. Однако в природе ГВ находятся в гидратированном виде, поэтому наличие в их структуре гидрофобных и гидрофильных функциональных групп определяет пространственную конфигурацию ГВ и характер

их взаимодействия с минеральной частью почвы. Гидрофобным компонентам ГВ энергетически более выгодно минимизировать площадь контакта с водой, в то время как гидрофильные части молекул ГВ будут обращены в водную среду. Кроме того, показано влияние водных молекулярных мостиков на “сшивание” отдаленных гидрофильных участков ГВ ([Aquino et al., 2011](#)). Состав ГВ чувствителен к видам агрогенной нагрузки, при этом любые изменения в строении ГВ повлияют на их амфифильные свойства.

Влияние обработки почвы на устойчивость супрамолекулярной организации ГВ обусловлено главным образом изменением водно-воздушного режима, что влечет за собой изменения процессов гумификации/минерализации ОВ. Вспашка почвы повышает содержание кислорода в верхнем слое почвы, что приводит не только к увеличению активности аэробной микробиоты, способствующей минерализации ГВ, но и к повышению количества кислородсодержащих функциональных групп в молекулах ОВ в процессе гумификации. Кислородсодержащие функциональные группы (ОН– и С=О карбоксильные группы) увеличивают реакционную активность ГК, при этом отмечается стабилизация ГК преимущественно за счет водородных связей между кислородсодержащими группами ароматических структур, что вызывает гидрофильную гидратацию. Наличие большого количества полярных структур, представленных кислородсодержащими группами, способными к межмолекулярным взаимодействиям, координируемым водородными связями водных кластеров, приводит к увеличению содержания свободной воды в ГК распахиваемого чернозема ([Скрыльник и др., 2018](#)).

Гидрофобные компоненты ГВ предохраняют новообразованные ГВ от микробиологической минерализации ([Cihlár et al., 2014](#)). Таким образом, соотношение гидрофобных и гидрофильных компонентов ГВ может указывать на наличие деградационных процессов, вызванных антропогенным воздействием на почву. Мониторинг изменений гидрофобно-гидрофильных свойств ГВ почв необходим для поддержания хорошей почвенной структуры, обеспечивающей оптимальные условия для жизнедеятельности растений и биоты, а также для сохранения экологических функций почв.

ГВ в почве могут быть представлены как свободным ОВ, так и окклюдированным на минеральных зернах. Различия в природе ОВ отражаются на скорости его трансформации. Органо-минеральные взаимодействия – ключевой механизм стабилизации ОВ в почве ([Семенов и др., 2013](#)). Качественный анализ почвенного ОВ проводят с учетом его принадлежности к определенной физической фракции. Основные отличия разных почвенных фракций обусловлены особенностями органо-минеральных взаимодействий в них, которые, в свою очередь, определяют стабильность почвенного ОВ ([Six et al., 2002](#); [Eusterhues et al., 2003](#); [Kaiser, Guggenberger, 2003](#)). Фракция, в которой ОВ сорбировано на поверхности минералов, представлена илом с размером частиц <1 мкм. Илистая фракция является наиболее устойчивой, она медленнее реагирует на изменения в системе землепользования ([Campbell et al., 1991](#); [Buyanovsky et al., 1994](#); [Skjemstad et al., 2004](#); [Chung et al., 2008](#)). Устойчивость органо-глинистых комплексов обусловлена снижением доступности ОВ для микробной минерализации за счет адсорбции ОВ на минеральной поверхности ([Dungait et al., 2012](#)). Доля таких ассоциаций в почвах может достигать 50% и более, также для большинства типов почв именно эта фракция составляет основную часть запаса углерода в почве ([Christensen, 1992](#)). Фракция, представленная свободным ОВ и микроагрегатами, устойчивыми к УЗ обработке, имеет плотность <2 г/см³ и называется легкой фракцией (ЛФ). ЛФ наиболее чувствительна к изменению условий землепользования, т. к. она преимущественно представлена свободным ОВ, что делает эту фракцию более лабильной ([Balesdent, 1987](#); [Whalen et al., 2000](#); [Травникова, 2002](#); [Gregorich et al., 2006](#); [Zimmermann et al., 2007](#); [Gregorich, Beare, 2008](#); [Когут и др., 2010](#); [Baldock et al., 2018](#); [Curtin et al., 2019](#)). Свободное ОВ почв представлено макроорганическим веществом >50 мкм и обычно составляет 10–25% общего запаса углерода в почве. Оно содержит менее разложенное ОВ с широким соотношением C : N ([Gregorich et al., 2006](#)).

По мнению некоторых авторов ([Артемьева, Кириллова, 2017](#)), устойчивость почв определяется соотношением трех основных групп органо-минеральных фракций (ЛФ с плотностью <2 г/см³, ил, остаток). Состав и свойства почвенных фракций

определяют важность их анализа при отслеживании деградационных изменений почв.

В настоящее время растет число исследований гидрофобности поверхности твердой фазы минералов, различных песчаных смесей и почв ([Shang et al., 2008](#); [Leelamanie et al., 2010](#); [Zickenrott et al., 2016](#); [Chen et al., 2018](#)), однако поверхностная организация разных по гидрофобности функциональных групп хоть и может служить маркером происходящих в почве процессов, но не является достаточной для понимания какие изменения претерпевает почвенное ОВ. Поэтому цель данной работы выявить функциональное изменение ОВ черноземов, подверженных антропогенной нагрузке, с помощью жидкостной хроматографии гидрофобного взаимодействия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является чернозем территории Воронежского НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева, Каменная Степь, расположенной 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, как разновозрастных пашен, так и многолетней залежи Каменной Степи, можно определить как периодически промывной с дополнительным грунтовым увлажнением ([Лебедева и др., 2016](#)).

Исследованы образцы почв 3 делянок опытных полей, по степени антропогенной нагрузки они разделяются на варианты опыта: с минимальной агротехнической нагрузкой – “косимая степь” (более 100 лет); с максимальной нагрузкой – “бессменный черный пар” (с 1962 г.) и “бессменная кукуруза” (с 1962 г.). Исследование проведено на образцах почв из слоя 0–20 см. Согласно классификации WRB, почва распахиваемых участков относится к Anthrosols, а почва залежного участка “косимой степи” к Haplic Chernozem ([WRB, 2014](#)).

Аналитическая характеристика образцов почв включала: общее содержание С и N методом сухого сжигания на автоматическом анализаторе Vario MAX CN в 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 г/см³ и фракция остатка с плотностью >2 г/см³.

В выделенных фракциях ила и остатка был проведен анализ гранулометрического состава методом лазерной дифракции с целью проверки полноты фракционирования. Фракция ила более чем на 90% представлена частицами размером <1 мкм, фракция остатка имеет размер частиц преимущественно 2–50 мкм.

Изучение качественного состава ГВ почв и гранулоденсиметрических фракций было проведено с помощью жидкостной хроматографии гидрофобного взаимодействия по методу, разработанному Е.Ю. Милановским ([2000](#)). Экстракцию ГВ почв проводили с помощью щелочного раствора пиродифосфата натрия (0.1 н. NaOH + 0.1 н. Na₄P₂O₇) при соотношении почва : раствор – 1 : 10. Почвенную суспензию помещали в термостат на сутки при 40 °С. От минеральных примесей выделенные ГВ очищали центрифугированием (12 000 об./мин, 15 мин).

Жидкостная хроматография гидрофобного взаимодействия проведена на хроматографе BIO RAD. Оптическая плотность элюата измерялась при длине волны 280 нм. Постоянная скорость фильтрации (1 мл/мин) контролировалась перистальтическим насосом. Площадь пиков хроматографических фракций рассчитывали при помощи программы МультиХром. Площадь пика хроматографической фракции, выраженная в процентах от общей площади хроматограммы, дает представление об относительном содержании ГВ, различающихся по гидрофобно-гидрофильным свойствам. На рисунке 1 представлен пример получаемых хроматограмм для образцов почвы, ила и ЛФ.

Пики хроматографической кривой (рис. 1) обозначают выход фракций, различающихся по степени связывания с гидрофоб-

ной матрицей геля:

1-я фракция является самой гидрофильной и практически не связывается с матрицей геля, она выходит вместе с потоком стартового буфера (ТРИС-НСI буфер), с максимальным количеством сульфата аммония.

2-я фракция выделяется при снижении концентрации сульфата аммония.

3-я фракция элюируется чистым ТРИС-НСI буфером.

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

5-я фракция вымывается щелочным раствором ЭДТА.

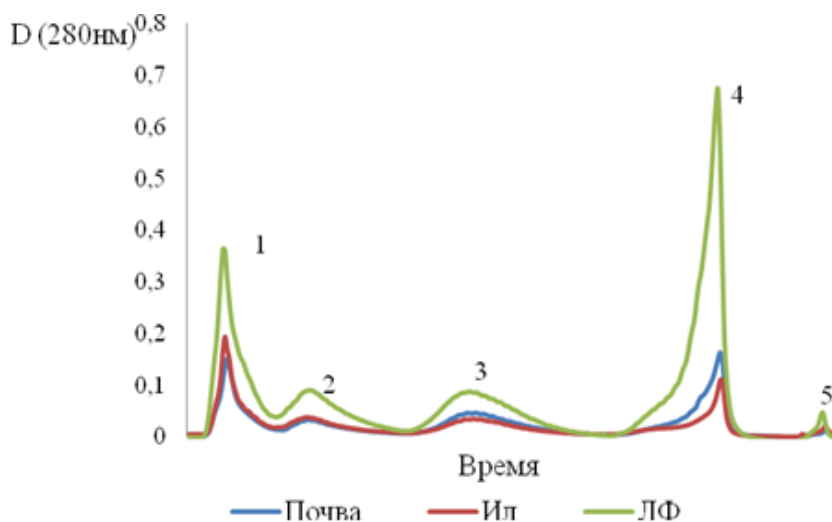


Рис. 1. Хроматографические кривые ГВ почвы, ила и ЛФ чернозема.

Fig. 1. The chromatographic curves of soil, clay and LF of chernozem.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное гранулоденсиметрическое фракционирование почв позволило выявить изменение соотношения 3 выделяемых

почвенных фракций чернозема при различной антропогенной нагрузке. Наиболее чувствительной к изменению внешних условий исследователи считают ЛФ с плотностью $<2.0 \text{ г/см}^3$, которая служит источником для формирования ГВ. В ее состав входят органические остатки растительного, животного и микробного происхождения различной степени гумификации. С этой фракцией связана значительная часть микробных популяций и ферментативная активность почв (Артемова, 2010). На рисунке 2 представлено распределение гранулоденсиметрических фракций чернозема исследуемых вариантов опыта. Ввиду трудоемкости гранулоденсиметрического фракционирования анализ был проведен на смешанных образцах (из трех индивидуальных) каждого варианта использования в двукратной повторности. На основании полученных данных отмечено существенное различие в содержании ЛФ распахиваемых участков по сравнению с нераспахиваемым участком “косимой степи”. Содержание ЛФ в почве “косимой степи” превышало 16%, в то время как чернозем пашни содержал примерно 10% ЛФ.

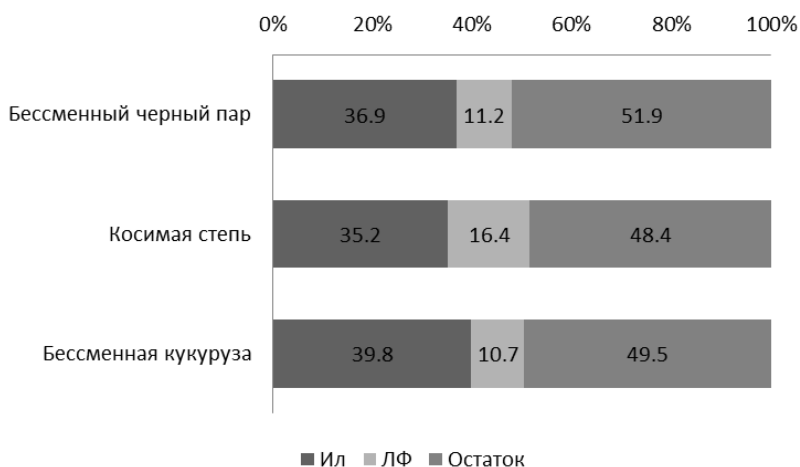


Рис. 2. Содержание гранулоденсиметрических фракций в слое 0–20 см чернозема разных вариантов использования

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

Чувствительность ЛФ к системе землепользования объясняется ее составом: наличием либо отсутствием легкоразлагаемого ОВ – постоянного источника легкодоступных элементов для растений ([Травникова, 2002](#)). В черноземе “косимой степи” поступление растительных остатков существенно выше, чем в черноземе под “бессменной кукурузой” и в почве “бессменного черного пара”, что и обуславливает наиболее высокое – в 1.5 раза больше, по сравнению с этими вариантами, – содержание легкой фракции.

Результаты показывают (табл. 1), что легкие фракции наиболее обогащены углеродом. Содержание в них С (%) в 4.7–5.3 раза больше, чем в илистой фракции. При этом содержание N (%) в ЛФ в 3.8 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 органического вещества азотом. Наиболее обогащено азотом органическое вещество илистой фракции (10.7–11.0), менее всего – ЛФ (13.9–15.2). Чем меньше соотношение С : N, тем сильнее выражена минерализация ОВ. 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.

Изучение качественного состава ОВ чернозема и гранулоденсиметрических фракций, проведенное с помощью жидкостной хроматографии гидрофобного взаимодействия, показало изменение амфифильных свойств ОВ твердой фазы. Различия в содержании углерода в почве и гранулометрических фракциях учитывались при взятии навески для щелочной экстракции ГВ.

Гумусовые вещества, элюирующиеся из колонки в присутствии сульфата аммония и входящие в состав первых двух хроматографических фракций, относятся к гидрофильным, а последних трех фракций – к гидрофобным. Результаты хроматографического фракционирования щелочных экстракций ГВ из почв, ила и ЛФ представлены в таблице 2.

Таблица 1. Содержание углерода и азота в образцах почв и гранулоденсиметрических фракциях чернозема
Table 1. The contents of carbon and nitrogen in samples of soils and size-density fractions of chernozem

Объект	Почва			Ил, <1мкм			Легкая фракция, <2 г/см ³			Остаток, >2 г/см ³		
	С, %	N, %	С : N	С, %	N, %	С : N	С, %	N, %	С : N	С, %	N, %	С : N
	для почв С и N – % от массы почвы; для фракций – % от массы фракций											
Бессменный черный пар	4.36	0.36	12.2	4.67	0.42	11.0	23.96	1.59	15.1	0.74	0.07	10.7
Косимая степь	6.25	0.53	11.7	4.55	0.41	11.0	23.91	1.57	15.2	0.69	0.06	11.6
Бессменная кукуруза	4.71	0.4	11.8	4.92	0.46	10.7	23.09	1.66	13.9	0.66	0.06	11.1

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. Так как 1-я и 2-я фракции представлены преимущественно гидрофильными соединениями, а 3, 4 и 5-я – гидрофобными, степень гидрофильности (Dh) может быть рассчитана по отношению между суммами фракций разной природы ([Дымов, Милановский, 2014](#)).

Таблица 2. Относительное содержание хроматографических фракций щелочных экстракций ГВ из почв, ила и ЛФ чернозема

Table 2. Relative content of chromatographic fractions of alkaline extracts of HS from soils, clay and LF of chernozem

Хроматографические фракции	Бессменный черный пар	Косимая степь	Бессменная кукуруза
Исходная почва			
1	24.76	32.02	25.44
2	13.18	13.70	13.50
3	27.01	22.35	29.31
4	33.92	30.93	30.70
5	1.15	1.01	1.06
Илистая фракция, <1 мкм			
1	33.17	39.96	32.65
2	17.25	14.34	15.21
3	22.31	17.91	23.75
4	24.94	25.86	27.02
5	2.34	1.93	1.39
Легкая фракция, <2 г/см ³			
1	20.17	30.12	22.47
2	12.21	12.24	13.74
3	22.07	15.34	18.03
4	43.90	40.12	44.04
5	1.66	2.18	1.73

Но при сравнении изначально близких по свойствам почвенных образцов более показательным может быть отношение наиболее гидрофильной фракции к наиболее гидрофобной, т. е. 1-го и 4-го пиков хроматографической кривой. Чем ниже это соотношение, тем больше выражена гидрофобность компонентов ГВ (Милановский и др., 2005; Дымов и др., 2015). Соотношения долей 1-й и 4-й хроматографической фракции для разных вариантов использования чернозема представлены на рисунке 3.

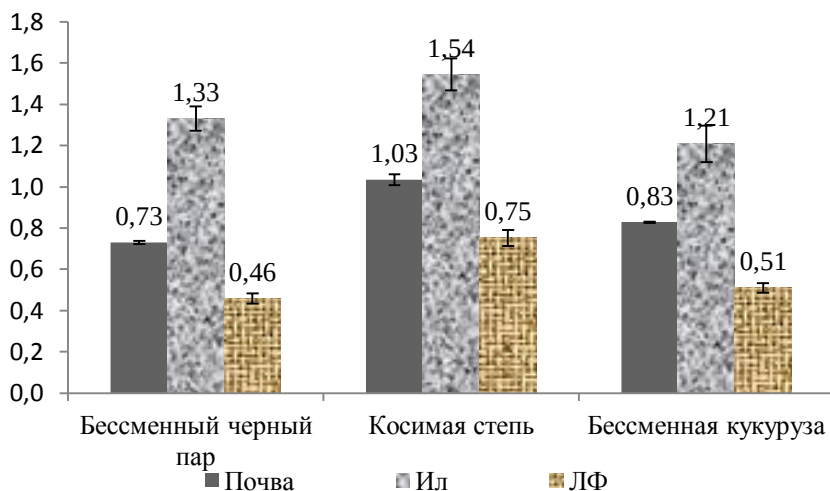


Рис. 3. Степень гидрофильности ГВ чернозема разных вариантов использования.

Fig. 3. Degree of hydrophilicity of chernozem soil in different land use cases.

Стоит отметить, при одинаковой направленности изменения степени гидрофильности ГВ как почв, так и почвенных фракций интенсивность изменений различна. Так ГВ ЛФ “косимой степи” оказались на 63% более гидрофильными, по сравнению с ГВ ЛФ “бессменного черного пара”, и на 47% – по сравнению с ГВ ЛФ “бессменной кукурузы”. В то время как гидрофильность ГВ ила отличалась на 16 и 27% соответственно. Гидрофильность ГВ исходной почвы на делянке “косимой степи” была на 41% выше гидрофильности ГВ в почве на делянке “бессменного черного па-

ра” и на 24% выше, чем в почве делянки “бессменной кукурузы”. Снижение гидрофильности ГВ почвы и почвенных фракций пахотного слоя “бессменного черного пара”, по сравнению с аналогичным слоем чернозема “косимой степи”, объясняется природой гидрофильных компонентов ГВ, а именно их подвижностью ввиду сродства к воде. Свежее ОВ в почву “бессменного черного пара” не поступало, а значит, имеющееся ОВ либо накапливалось в месте своего образования в случае гидрофобной природы, либо мигрировало вниз по почвенному профилю в случае гидрофильной природы. Гидрофобизация органических остатков при их гумификации происходит за счет селективной микробиологической утилизации гидрофильных (углеводы, сахара и т. д.) индивидуальных соединений и структурных алифатических фрагментов макромолекул, содержащих кислород и азот, а также выноса из зоны гумификации водорастворимых органических соединений. В результате происходит остаточное накопление неподвижных, не связанных с минеральной матрицей, биотермодинамически устойчивых (в данных экологических условиях) продуктов гумификации *in situ*, обладающих пониженным содержанием алифатических структур и функциональных групп – гидрофобных ГВ ([Милановский, 2009](#)).

На участке “бессменной кукурузы” степень гидрофильности ГВ как почвы в целом, так и почвенных фракций была несколько выше, чем в “бессменном черном паре”. Увеличение гидрофильности было выявлено одновременно с большим содержанием общего углерода в почве, обусловленного поступлением растительных остатков кукурузы.

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. Было показано, что большое содержание гидрофобных функциональных групп на поверхности твердой фазы характеризуется наибольшими величинами КУС и характерно для нативной, не обрабатываемой почвы “косимой степи”, которая также отличается от других исследованных вариантов опыта по всем изученным физико-химическим показателям. Механическая обработка почвы в виде вспашки с оборотом пласта, парование

1 приводят к изменениям физико-химических свойств почв и каче-
2 ственного состава ОВ в сторону их ухудшения и снижения как
3 содержания углерода, так и величины КУС. Для изученных почв
4 величина КУС меняется в следующем ряду: “косимая степь”
5 ($45.0^\circ \pm 2.8^\circ$) > “бессменная кукуруза” ($35.4^\circ \pm 3.3^\circ$) > “бессмен-
6 ный черный пар” ($32.1^\circ \pm 2.1^\circ$). Таким образом, наблюдается пря-
7 мая корреляция между гидрофобностью твердой фазы почв и сте-
8 пенью гидрофильности ГВ исходных почв и ЛФ. При этом гидро-
9 фильность илистой фракции снижается в ряду: “косимая степь” >
10 “бессменный черный пар” > “бессменная кукуруза”. Различие в
11 степени гидрофильности ГВ ила указывает на большую минерали-
12 зацию ОВ ила чернозема “бессменного черного пара” по сравне-
13 нию с черноземом “бессменной кукурузы”, что, по всей видимо-
14 сти, обусловлено отсутствием поступления свежего ОВ в почву
15 “бессменного черного пара”.

16 Чем выше соотношение площадей 1-го и 4-го пиков, тем
17 больше выражена гидрофильность исследуемых ГВ. Положитель-
18 ная корреляция между КУС и этим соотношением указывает на
19 то, что увеличение гидрофобности поверхности твердой фазы
20 почв происходит одновременно с увеличением доли гидрофиль-
21 ных компонентов в составе ГВ. Это легко объясняется особенно-
22 стями связей между органическим веществом и минеральной по-
23 верхностью, так как последняя является гидрофильной, то устой-
24 чивая связь с ней может возникнуть только за счет взаимодей-
25 ствия полярных групп. Таким образом, полярные (гидрофильные)
26 функциональные группы соединяются с минеральной поверхно-
27 стью, а гидрофобные функциональные группы будут ориентиро-
28 ваны наружу (что характерно для илистой фракции). Как мы ви-
29 дим, относительное накопление гидрофильных компонентов ГВ
30 происходит с одновременным увеличением содержания углерода
31 в почве, что может свидетельствовать не только о продуктивно-
32 сти, но и об устойчивости системы в целом. Как уже отмечалось
33 ранее, чувствительность ЛФ к изменению антропогенной нагрузки
34 выше, чем илистой, т. к. она представлена преимущественно сво-
35 бодным ОВ, не связанным с минеральной матрицей почвы. Это
36 утверждение также подтверждается большей интенсивностью из-
37 менения степени гидрофильности ГВ ЛФ по сравнению с ГВ ила.

Относительное накопление гидрофильных компонентов ГВ в почве “косимой степи” обусловлено существенно большим поступлением растительных остатков в верхний слой почвы, по сравнению с черноземом “бессменного черного пара” и “бессменной кукурузы”. Различия гидрофобно-гидрофильных свойств ГВ почвы “бессменного черного пара” и “бессменной кукурузы” могут определяться наличием/отсутствием растительных остатков и экссудатов корней кукурузы. Ввиду того, что привнос растительных остатков в почву “бессменного черного пара” длительное время был минимальным, повышение гидрофобности его ОВ, не связанного с минеральной матрицей (ЛФ), обусловлено микробной минерализацией и частично выносом подвижных гидрофильных молекул из пахотного горизонта. В почву под “бессменной кукурузой”, в отличие от почвы “бессменного черного пара”, поступали и корневые выделения, которые приводят к гидрофобизации твердой фазы почв. Данное предположение согласуется с результатами исследования влияния корневых выделений сельскохозяйственных культур, в том числе и корневых выделений кукурузы, на гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы почв при моделировании системы с использованием песка и ила с различным содержанием корневых выделений растений ([Ahmed et al., 2016](#); [Moradi et al., 2012](#); [Zickenrott et al., 2016](#)). Отмечалось увеличение гидрофобности поверхности песка при увеличении содержания в нем корневых выделений кукурузы ([Zickenrott et al., 2016](#)). Поверхность растительных остатков, в большом количестве поступающих в почву при выращивании кукурузы, также является гидрофобной. Так увеличение количества гидрофобных выделений в почву способствует сохранению гидрофильных компонентов, что обуславливает устойчивость почвы к деградационным изменениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что гидрофобно-гидрофильные свойства ГВ чернозема и его гранулоденсиметрических фракций зависят от условий землепользования.

Состав ГВ чувствителен к виду антропогенной нагрузки – при большем поступлении растительных остатков и кислорода в

пахотном слое почвы формируется гидрофильное ОВ, которое, в свою очередь, из-за сродства к воде обладает подвижностью и большей доступностью для поглощения почвенной биотой.

Относительное накопление гидрофильных компонентов в составе ГВ при одновременном увеличении гидрофобности поверхности твердой фазы почвы может свидетельствовать об устойчивости почвы в целом.

Состав ГВ почвенных фракций более чувствителен к изменениям нагрузки, чем почва в целом, поэтому изучение их гидрофобно-гидрофильных свойств следует использовать при мониторинге деградационных изменений сельскохозяйственных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адерихин П.Г., Богатырева З.С. Воздействие защитных лесных насаждений на содержание и состав органического вещества обыкновенных черноземов Каменной Степи // Почвоведение. 1974. № 5. С. 43–53.
2. Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы // Издательство: ГЕОС. 2010. 240 с.
3. Артемьева З.С., Кириллова Н.П. Роль продуктов органо-минерального взаимодействия в структурообразовании и гумусообразовании основных типов почв центра Русской равнины // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 73–95. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-73-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-73-95).
4. Басов Г.Ф., Грищенко М.Н. Гидрологическая роль лесных полос (по данным исследований, проведенных в Каменной Степи). М.: Гослесбумиздат, 1963. 201 с.
5. Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Трансформация почвенного поглощающего комплекса черноземных почв каменной степи при длительном постмелиоративном воздействии // Агрофизика. 2018. № 4. С. 9–16.
6. Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга Республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47.
7. Дымов А.А., Милановский Е.Ю., Холодов В.А. Состав и гидрофобные свойства органического вещества денситметрических фракций почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1335–1345.
8. Зборишук Ю.Н. Особенности гумуса черноземов обыкновенных

- Каменной Степи // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2007. № 2. С. 3–9.
9. *Козут Б.М., Шульц Э., Титова Н.А., Холодов В.А.* Органическое вещество гранулоденсиметрических фракций целинного и пахотного типичного чернозема // *Агрохимия*. 2010. № 8. С. 3–9.
10. *Козут Б.М., Титова Н.А., Булеева В.С.* Антропогенная трансформация качественного состава гумуса черноземов Каменной Степи // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2009. Вып. 64. С. 41–49.
11. *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).
12. *Мамонтов В.Г., Соколовская Е.Л.* Элементный и молекулярно-массовый состав лабильных гумусовых веществ чернозема обыкновенного каменной степи // *Известия ТСХА*. 2018. № 1. С. 130–138.
13. *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).
14. *Милановский Е.Ю.* Амфифильные компоненты гумусовых веществ почв // *Почвоведение*. 2000. № 6. С. 706–715.
15. *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.
16. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 188 с.
17. *Семенов В.М., Тулина А.С., Семенова Н.А., Иванникова Л.А.* Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // *Почвоведение*. 2013. № 4. С. 393–407.
18. *Скрыльник Е.В., Шевченко Н.В., Попирный М.А., Николов О.Т.* Конформационные перестройки супраструктуры гуминовых кислот чернозема типичного в зависимости от способов обработки почвы // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*. 2018. 63 (2). С. 209–221.

19. *Травникова Л.С.* Закономерности гумусонакопления: новые данные и их интерпретация // Почвоведение. 2002. № 7. С. 832–843. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=13839501>.
20. *Чеве́рдин Ю.И., Беспалов В.А.* Пространственное варьирование содержания гумуса в черноземах Каменной Степи // Плодородие. 2011. № 4. С. 28–29.
21. *Шаймухаметов М.Ш., Титова Н.А., Травникова Л.С.* Применение физических методов фракционирования для характеристики органического вещества почв // Почвоведение. 1984. № 8. С. 131–141.
22. *Ahmed M.A., Kroener E., Benard P., Zarebanadkouki M., Kaestner A., Carminati A.* Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere of maize: Measurements and modeling // Plant Soil. 2016. Iss. 407. pp. 161–171. URL: [10.1007/s11104-015-2749-1](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2749-1).
23. *Aquino A.J., Tunega D., Pašalić H., Schaumann G.E., Haberhauer G., Gerzabek M.H., Lischka H.* Molecular dynamics simulations of water molecule-bridges in polar domains of humic acids // Environmental science & technology. 2011. Vol. 45. Iss. 19. P. 8411–8419. DOI: [10.1021/es201831g](https://doi.org/10.1021/es201831g).
24. *Bachmann J., Goebel M.-O., Krueger J., Fleige H., Woche S., Dörner J., Horn R.* Aggregate stability of south Chilean volcanic ash soils – A combined XPS, contact angle, and surface charge analysis // Geoderma. 2020. Iss. 361. pp. 114022. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114022](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114022).
25. *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. DOI: [10.1071/SR17221](https://doi.org/10.1071/SR17221).
26. *Balesdent J.* The turnover of soil organic fractions estimated by radiocarbon dating // Science of the Total Environment. 1987. Vol. 62. P. 405–408. DOI: [10.1016/0048-9697\(87\)90528-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90528-6).
27. *Buyanovsky G.A., Aslam M., Wagner G.H.* Carbon turnover in soil physical fractions // Soil Science Society of America Journal. 1994. Vol. 58(4). P. 1167–1173. DOI: [10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x](https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x).
28. *Campbell C.A., Biederbeck V.O., Zentner R.P., Lafond G.P.* Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem // Canadian Journal of Soil Science. 1991. Vol. 71. Iss. 3. P. 363–376. DOI: [10.4141/cjss91-035](https://doi.org/10.4141/cjss91-035).
29. *Capriel P.* Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management // European Journal of Soil Science. 1997. Vol. 48. Iss. 3. P. 457–462.
30. *Chen J., Shang C., Eick M.J., Stewart R.D.* Water repellency decreases vapor sorption of clay minerals // Water Resources Research. 2018. Vol. 54.

1 Iss. 9. P. 6114–6125.

2 31. *Christensen B.T.* Physical fractionation of soil and organic matter in
3 primary particle size and density separates, In: *Advances in soil science*. 1992.
4 P. 1–90. DOI: [10.1007/978-1-4612-2930-8_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1).

5 32. *Chung H., Grove J.H., Six J.* Indications for soil carbon saturation in a
6 temperate agroecosystem // *Soil Science Society of America Journal*. 2008.
7 Vol. 72. Iss. 4. P. 1132–1139. DOI: [10.2136/sssaj2007.0265](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265).

8 33. *Cihlář Z., Vojtová L., Conte P., Nasir S., Kučerík J.* Hydration and water
9 holding properties of cross-linked lignite humic acids // *Geoderma*. 2014. Vol.
10 230. P. 151–160. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.04.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.018).

11 34. *Curtin D., Beare M.H., Weiwen Q.I.U., Sharp J.* Does particulate organic
12 matter fraction meet the criteria for a model soil organic matter pool? //
13 *Pedosphere*. 2019. Vol. 29. Iss. 2. P. 195–203. DOI: [10.1016/S1002-](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60049-9)
14 [0160\(18\)60049-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60049-9).

15 35. *Diamantis V., Pagorogon L., Gazani E., Doerr S.H., Pliakas F., Ritsema*
16 *C.J.* Use of olive mill wastewater (OMW) to decrease hydrophobicity in sandy
17 soil // *Ecological engineering*. 2013. Vol. 58. P. 393–398.

18 36. *Dungait J.A., Hopkins D.W., Gregory A.S., Whitmore A.P.* Soil organic
19 matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance // *Global Change*
20 *Biology*. 2012. Vol. 18. Iss. 6. P. 1781–1796. DOI: [10.1111/j.1365-](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x)
21 [2486.2012.02665.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x).

22 37. *Eusterhues K., Rumpel C., Kleber M., Kögel-Knabner I.* Stabilisation of
23 soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral
24 dissolution and oxidative degradation // *Organic Geochemistry*. 2003. Vol. 34.
25 Iss. 12. P. 1591–1600. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2003.08.007](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.08.007).

26 38. *Gregorich E.G., Beare M.H.* Physically uncomplexed organic matter //
27 *Soil sampling and methods of analysis*. 2008. P. 607–616.

28 39. *Gregorich E.G., Beare M.H., McKim U.F., Skjemstad J.O.* Chemical and
29 biological characteristics of physically uncomplexed organic matter // *Soil*
30 *Science Society of America Journal*. 2006. Vol. 70. Iss. 3. P. 975–985. DOI:
31 [10.2136/sssaj2005.0116](https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0116).

32 40. *Kaiser K., Guggenberger G.* Mineral surfaces and soil organic matter //
33 *European Journal of Soil Science*. 2003. Vol. 54. Iss. 2. P. 219–236.

34 41. *Kraemer F.B., Hallett P.D., Morras H., Garibaldi L., Cosentino D., Duval*
35 *M., Galantini J.* Soil stabilisation by water repellency under no-till
36 management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality //
37 *Geoderma*. 2019. Vol. 355. P. 1–11. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.113902](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113902).

38 42. *Leelamanie D.A.L., Karube J., Yoshida A.* Clay effects on the contact angle
39 and water drop penetration time of model soils // *Soil Science and Plant*
40 *Nutrition*. 2010. Vol. 56. Iss. 3. P. 371–375.

43. *Moradi A.B., Carminati A., Lamparter A., Woche S.K., Bachmann J., Vetterlein D., Vogel H.J., Oswald S.E.* Is the Rhizosphere Temporarily Water Repellent? // *Vadose Zone Journal*. 2012. Vol. 11. Iss. 3. DOI: [10.2136/vzj2011.0120](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0120).
44. *Shakesby R., Doerr S., Walsh R.* The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions // *Journal of hydrology*. 2000. Vol. 231. P. 178–191.
45. *Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L.* Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 328. Iss. 2. P. 299–307.
46. *Šimon T., Javůrek M., Mikanova O., Vach M.* The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity // *Soil and Tillage Research*. 2009. Vol. 105. Iss. 1. P. 44–48.
47. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // *Plant and soil*. 2002. Vol. 241. Iss. 2. P. 155–176.
48. *Skjemstad J.O., Spouncer L.R., Cowie B., Swift R.S.* Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Soil Research*. 2004. Vol. 42. Iss. 1. P. 79–88. DOI: [10.1071/SR03013](https://doi.org/10.1071/SR03013).
49. *Whalen J.K., Bottomley P.J., Myrold D.D.* Carbon and nitrogen mineralization from light-and heavy-fraction additions to soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32. Iss. 10. P. 1345–1352. DOI: [10.1016/S0038-0717\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00040-7).
50. *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).
51. *Zhang G.S., Chan K.Y., Oates A., Heenan D.P., Huang G.B.* Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 92. Iss. 1–2. P. 122–128. DOI: [10.1016/j.still.2006.01.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.006).
52. *Zickenrott I.M., Woche S.K., Bachmann J., Ahmed M.A., Vetterlein D.* An efficient method for the collection of root mucilage from different plant species: A case study on the effect of mucilage on soil water repellency // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2016. Iss. 179. P. 294–302. DOI: [10.1002/jpln.201500511](https://doi.org/10.1002/jpln.201500511).
53. *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. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x).

REFERENCES

1. Aderihin P.G., Bogatyreva Z.S., Vozdejstvie zashchitnyh lesnyh nasazhdenij na sodержanie i sostav organicheskogo veshchestva obyknovennyh chernozemov Kamennoj Stepi (Impact of protective forest stands on the content and composition of organic matter of ordinary chernozems of the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 1974, Vol. 5, pp. 43–53.
2. Artemyeva Z.S., *Organicheskoe veshchestvo i granulometricheskaya sistema pochvy* (Organic matter and particle size distribution of the soil system), Moscow: Izdatel'stvo GEOS, 2010, 240 p.
3. Artemyeva Z.S., Kirillova N.P., The Role of Organic and Mineralogical Interaction Products in the Structure Forming and Humus Forming of the Basic Types of Soils in the Center of Russian Plain, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 90, pp.73–95, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-90-73-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-73-95).
4. 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.
5. Bespalov V.A., CHEverdin Yu.I., Titova T.V., Transformaciya pochvennogo pogloshchayushchego kompleksa chernozemnyh pochv kamennoj stepi pri dlitel'nom postmeliorativnom vozdejstvii (Transformation of the soil absorbing complex of chernozem soils of the Kamennaya steppe under long-term post-meliorative influence), *Agrofizika*, 2018, Vol. 4, pp. 9–16.
6. Dymov A.A., Milanovskij E.Yu., Izmenenie organicheskogo veshchestva taezhnyh pochv v processe estestvennogo lesovozobnovleniya rastitel'nosti posle rubok (srednyaya tajga Respubliki Komi) (Changes in the organic matter of taiga soils in the process of natural reforestation of vegetation after logging (middle taiga of the Komi Republic), *Pochvovedenie*, 2014, Vol. 1, pp. 39–47.
7. Dymov A.A., Milanovskij E.Yu., Holodov V.A., Sostav i gidrofobnye svoystva organicheskogo veshchestva densimetricheskikh frakcij pochv Pripolyarnogo Urala (Composition and hydrophobic properties of organic matter of densimetric fractions of soils of the Circumpolar Urals), *Pochvovedenie*, 2015, Vol. 11, pp. 1335–1345.
8. Zborishchuk Yu.N., Osobennosti gumusa chernozemov obyknovennyh Kamennoj Stepi (Characteristics of the humus of Chernozem ordinary of Kamennaya Steppe), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2007, Vol. 2, pp. 3–9.
9. Kogut B.M., Shul'ts E., Titova N.A., Kholodov V.A., Organicheskoe veshchestvo granulodensimetricheskikh fraktsii tselinnogo i pakhotnogo

- 1 tipichnogo chernozema (Organic matter of granulodensimetric fractions of
2 virgin and arable typical chernozem), *Agrohimiya*, 2010, Vol. 8, pp. 3–9.
- 3 10. Kogut B.M., Titova N.A., Buleeva V.S., Antropogennaya transformaciya
4 kachestvennogo sostava gumusa chernozemov KamЕННОj Stepi
5 (Anthropogenic transformation of the qualitative composition of the humus of
6 the chernozems of the Stone Steppe), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Vol. 64,
7 pp. 41–49.
- 8 11. Lebedeva I.I., Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Yu.I.,
9 Bespalov V.A., The experience of the complex assesement of the impact of
10 the length of agricultural use on properties and regimes of agrochernozems of
11 Stony Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 83, pp. 77–102, DOI:
12 [10.19047/0136-1694-2016-83-77-102](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-77-102).
- 13 12. Mamontov V.G., Sokolovskaya E.L., Elementnyi i molekulyarno-
14 massovyj sostav labil'nykh gumusovykh veshchestv chernozema
15 obyknovennogo kamennoi stepi (The elemental and molecular mass
16 composition of labile humic substances of chernozem of ordinary Kamennaya
17 steppe), *Izvestiya TSKhA*, 2018, Vol. 1, pp. 130–138.
- 18 13. Matveeva N.V., Milanovsky E.Yu., Khaidapova D.D., Rogova O.B., The
19 contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical
20 properties of Chernozems of Kamennaya Steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin*,
21 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).
- 22 14. Milanovskij E.Yu., Amfifil'nye komponenty gumusovykh veshchestv pochv
23 (Amphiphilic components of humus substances of soils), *Pochvovedenie*,
24 2000, Iss. 6, pp. 706–715.
- 25 15. Milanovskij E.Yu., Shein E.V., Rusanov A.M., Zasypkina D.I., Nikolaeva
26 E.I., Anilova L.V., Pochvennaya struktura i organicheskoe veshchestvo
27 tipichnykh chernozemo Predural'ya pod lesom i mnogoletnej pashnej (Soil
28 structure and organic matter of typical chernozems of the Urals under forest
29 and perennial arable land. Humus substances of soils as natural hydrophobic-
30 hydrophilic compounds), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo*
31 *universiteta*, 2005, Vol. 2, pp. 113–117.
- 32 16. Milanovskij E.Yu., *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye*
33 *gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* (Conformational rearrangements of the
34 suprastructure of humic acids of typical chernozem depending on the methods
35 of tillage), Moscow: GEOS, 2009, 188 p.
- 36 17. Semenov V.M., Tulina A.S., Semenova N.A., Ivannikova L.A.,
37 Gumifikacionnye i negumifikacionnye puti stabilizacii organicheskogo
38 veshchestva v pochve (obzor) (Humification and non-humification ways to
39 stabilize organic matter in the soil (review)), *Pochvovedenie*, 2013, Vol. 4, pp.
40 393–407.
- 41 18. Skryl'nik E.V., Shevchenko N.V., Popirnyi M.A., Nikolov O.T.,

- 1 Konformatsionnye perestroiki suprastruktury guminovykh kislot chernozema
2 tipichnogo v zavisimosti ot sposobov obrabotki pochvy (Conformational
3 rearrangements of the suprastructure of humic acids of chernozem typical
4 depending on soil cultivation methods), *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk*
5 *Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*, 2018, Vol. 63, Iss. 2, pp. 209–221.
- 6 19. Travnikova L.S., Zakonomernosti gumusonakopleniya: novye dannye i ih
7 interpretatsiya (Regularities of humus accumulation: new data and their
8 interpretation), *Pochvovedenie*, 2002, No. 7, pp. 832–843.
- 9 20. Cheverdin Yu.I., Bupalov V.A., Prostranstvennoe var'irovanie
10 soderzhaniya gumusa v chernozemakh Kamennoi Stepi (Spatial variation of
11 the humus content in chernozems of the Kamennaya Steppe), *Plodородie*,
12 2011, Vol. 4, pp. 28–29.
- 13 21. Shajmuhametov M.Sh., Titova N.A., Travnikova L.S., Primenenie
14 fizicheskikh metodov frakcionirovaniya dlya harakteristiki organicheskogo
15 veshchestva pochv (Application of physical fractionation methods to
16 characterize soil organic matter), *Pochvovedenie*, 1984, Vol. 8, pp. 131–141.
- 17 22. Ahmed M.A., Kroener E., Benard P., Zarebanadkouki M., Kaestner A.,
18 Carminati A., Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere
19 of maize: Measurements and modeling, *Plant Soil*, 2016, Iss. 407, pp. 161–
20 171, DOI: [10.1007/s11104-015-2749-1](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2749-1).
- 21 23. Aquino A.J., Tunega D., Pašalić H., Schaumann G.E., Haberhauer G.,
22 Gerzabek M.H., Lischka H., Molecular dynamics simulations of water
23 molecule-bridges in polar domains of humic acids, *Environmental science &*
24 *technology*, 2011, Vol. 45, Iss. 19, pp. 8411–8419, DOI: [10.1021/es201831g](https://doi.org/10.1021/es201831g).
- 25 24. Bachmann J., Goebel M.-O., Krueger J., Fleige H., Woche S., Dörner J.,
26 Horn R., Aggregate stability of south Chilean volcanic ash soils – A combined
27 XPS, contact angle, and surface charge analysis, *Geoderma*, 2020, Iss. 361,
28 pp. 114022, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114022](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114022).
- 29 25. Baldock J.A., Beare M.H., Curtin D., Hawke B. Stocks, Composition and
30 vulnerability to loss of soil organic carbon predicted using mid-infrared
31 spectroscopy, *Soil Research*, 2018, Vol. 56(5), pp. 468–480, DOI:
32 [10.1071/SR17221](https://doi.org/10.1071/SR17221).
- 33 26. Balesdent J., The turnover of soil organic fractions estimated by
34 radiocarbon dating, *Science of the Total Environment*, Vol. 62, pp. 405–408,
35 DOI: [10.1016/0048-9697\(87\)90528-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90528-6).
- 36 27. Buyanovsky G.A., Aslam M., Wagner G.H., Carbon turnover in soil
37 physical fractions, *Soil Science Society of America Journal*, 1994, Vol. 58(4),
38 pp. 1167–1173, DOI: [10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x](https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x).
- 39 28. Campbell C.A., Biederbeck V.O., Zentner R.P., Lafond G.P., Effect of
40 crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass
41 and respiration in a thin Black Chernozem, *Canadian Journal of Soil Science*,

- 1991, Vol. 71, Iss. 3, pp. 363–376, DOI: [10.4141/cjss91-035](https://doi.org/10.4141/cjss91-035).
29. Capriel P., Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management, *European Journal of Soil Science*, 1997, Vol. 48, Iss. 3, pp. 457–462.
30. Chen J., Shang C., Eick M.J., Stewart R.D., Water repellency decreases vapor sorption of clay minerals, *Water Resources Research*, 2018, Vol. 54, Iss. 9, pp. 6114–6125.
31. Christensen B.T., Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates, In: *Advances in soil science*, 1992, pp. 1–90, DOI: [10.1007/978-1-4612-2930-8_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1).
32. Chung H., Grove J.H., Six J., Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem, *Soil Science Society of America Journal*, 2008, Vol. 72, Iss. 4, pp. 1132–1139, DOI: [10.2136/sssaj2007.0265](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265).
33. 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, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.04.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.018).
34. Curtin D., Beare M.H., Weiwen Q.I.U., Sharp J., Does particulate organic matter fraction meet the criteria for a model soil organic matter pool? *Pedosphere*, 2019, Vol. 29, Iss. 2, pp. 195–203, DOI: [10.1016/S1002-0160\(18\)60049-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60049-9).
35. Diamantis V., Pagorogon L., Gazani E., Doerr S.H., Pliakas F., Ritsema C.J., Use of olive mill wastewater (OMW) to decrease hydrophobicity in sandy soil, *Ecological engineering*, 2013, Vol. 58, pp. 393–398.
36. Dungait J.A., Hopkins D.W., Gregory A.S., Whitmore A.P., Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance, *Global Change Biology*, 2012, Vol. 18, Iss. 6, pp. 1781–1796, DOI: [10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x).
37. Eusterhues K., Rumpel C., Kleber M., Kögel-Knabner I., Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation, *Organic Geochemistry*, 2003, Vol. 34, Iss. 12, pp. 1591–1600, DOI: [10.1016/j.orggeochem.2003.08.007](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.08.007).
38. Gregorich E.G., Beare M.H., Physically uncomplexed organic matter, *Soil sampling and methods of analysis*, 2008, pp. 607–616.
39. Gregorich E.G., Beare M.H., McKim U.F., Skjemstad J.O., Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter, *Soil Science Society of America Journal*, 2006, Vol. 70, Iss. 3, pp. 975–985, DOI: [10.2136/sssaj2005.0116](https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0116).
40. Kaiser K., Guggenberger G., Mineral surfaces and soil organic matter, *European Journal of Soil Science*, 2003, Vol. 54, Iss. 2, pp. 219–236.
41. Kraemer F.B., Hallett P.D., Morras H., Garibaldi L., Cosentino D., Duval M., Galantini J., Soil stabilisation by water repellency under no-till

- management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality, *Geoderma*, 2019, Vol. 355, pp. 1–11, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.113902](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113902).
42. Leelamanie D.A.L., Karube J., Yoshida A., Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, Vol. 56, Iss. 3, pp. 371–375.
43. Moradi A.B., Carminati A., Lamparter A., Woche S.K., Bachmann J., Vetterlein D., Vogel H.J., Oswald S.E., Is the Rhizosphere Temporarily Water Repellent? *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11, Iss. 3, DOI: [10.2136/vzj2011.0120](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0120).
44. Shakesby R., Doerr S., Walsh R., The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions, *Journal of hydrology*, 2000, Vol. 231, pp. 178–191.
45. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L., Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, Vol. 328, Iss. 2, pp. 299–307.
46. Šimon T., Javůrek M., Mikanova O., Vach M., The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity, *Soil and Tillage Research*, 2009, Vol. 105, Iss. 1, pp. 44–48.
47. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K., Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils, *Plant and soil*, 2002, Vol. 241, Iss. 2, pp. 155–176.
48. Skjemstad J.O., Spouncer L.R., Cowie B., Swift R.S., Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools, *Soil Research*, 2004, Vol. 42, Iss. 1, pp. 79–88, DOI: [10.1071/SR03013](https://doi.org/10.1071/SR03013).
49. Whalen J.K., Bottomley P.J., Myrold D.D., Carbon and nitrogen mineralization from light-and heavy-fraction additions to soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, Vol. 32, Iss. 10, pp. 1345–1352, DOI: [10.1016/S0038-0717\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00040-7).
50. 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).
51. Zhang G.S., Chan K.Y., Oates A., Heenan D.P., Huang G.B., Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage, *Soil and Tillage Research*, 2007, Vol. 92, Iss. 1–2, pp. 122–128, DOI: [10.1016/j.still.2006.01.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.006).
52. Zickenrott I.M., Woche S.K., Bachmann J., Ahmed M.A., Vetterlein D., An efficient method for the collection of root mucilage from different plant species: A case study on the effect of mucilage on soil water repellency, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2016, Iss. 179, pp. 294–302, DOI: [10.1002/jpln.201500511](https://doi.org/10.1002/jpln.201500511).

- 1 53. Zimmermann M., Leifeld J. Schmidt M., Smith P., Fuhrer J., Measured
- 2 soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model,
- 3 *European Journal of Soil Science*, 2007, Vol. 58(3), pp. 658–667, DOI:
- 4 [10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x).