

УДК 631.41

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-76-123



Ссылки для цитирования:

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

Cite this article as:

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, V. 101, pp. 76-123, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-76-123

Благодарность:

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:

The research was carried out using equipment purchased in the framework of the Moscow State University Development Program.

Краевой угол смачивания как интегральный показатель физико-химических свойств черноземов Каменной степи

© 2020 г. Н. В. Матвеева^{1*}, Е. Ю. Милановский²,
Д. Д. Хайдапова², О. Б. Рогова¹

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
*e-mail: Nataliy.Matveeva@list.ru.

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

Поступила в редакцию 02.11.2019, после доработки 26.02.2020,
принята к публикации 04.03.2020

Резюме: Методом сидячей капли измеряли краевой угол смачивания (КУС) чернозема обыкновенного опытных полей агроландшафта Каменная степь ряда вариантов использования, различающихся как интенсивностью механического воздействия (заповедная косимая степь, вспашка с оборотом пласта), применением минеральных удобрений и их

последствием, а также изменением свойств почвы под действием орошения. Одновременно для физико-химической характеристики почв определяли общее содержание $C_{\text{орг}}$, отношение C/N , площадь удельной поверхности и реологические показатели. Результаты исследования показали, что гидрофильно-гидрофобные свойства поверхности твердой фазы почв, во многом определяющие основные структурообразующие свойства почв, могут быть охарактеризованы величиной краевого угла смачивания. Величина КУС исследованных образцов почв варьирует от 32 (наибольшая смачиваемость) до 45 градусов (наименьшая смачиваемость). Наименьшая смачиваемость обусловлена повышенным содержанием гидрофобных соединений в составе органического вещества почв и характеризуется наибольшими величинами КУС и характерна для нативной, не обрабатываемой почвы косимой степи, которая отличается от других исследованных вариантов опыта по всем изученным физико-химическим показателям. Механическая обработка почвы в виде вспашки с оборотом пласта, парование приводят к изменениям физико-химических свойств почв и качественного состава органического вещества в сторону их ухудшения и снижению величины КУС. Применение минеральных удобрений способствует увеличению исследуемого показателя преимущественно за счет изменения продуктивности растений, в частности различия КУС обусловлены воздействием на свойства почвы корневых выделений и растительных остатков. Для изученных почв величина КУС меняется в следующем ряду: Косимая степь > пашня с внесением минеральных удобрений > пашня в условиях последействия удобрений. Корреляционный анализ выявил связь КУС с содержанием органического углерода, площадью удельной поверхности и реологическими характеристиками черноземов. Таким образом, КУС может служить интегральным показателем изменения физико-химических свойств почв, их деградационных изменений в условиях различной агрогенной нагрузки. Используемый метод определения КУС требует меньшего количества образца по сравнению с реологическими методами и в целом более информативен, чем определение содержания органического вещества.

Ключевые слова: смачиваемость, гидрофильность, гидрофобность, краевого угол смачивания, системы землепользования.

The contact angle of wetting as an integral indicator of physical-chemical properties of Chernozems of Kamennaya Steppe

**N. V. Matveeva^{1*}, E. Yu. Milanovsky²,
D. D. Khaidapova², O. B. Rogova¹**

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 2119017, Russian Federation,*

**e-mail: Nataliy_Matveeva@list.ru.*

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

Received 02.11.2019, Revised 26.02.2020, Accepted 04.03.2020

Abstract: The sessile drop method was used to measure the contact angle of wetting (CA) of ordinary Chernozem from the fields of the Kamennaya Steppe agrolandscape used in various ways. The treatments differ in the intensity of tillage operations (protected mowed steppe, arable land after moldboard plowing), the use of mineral fertilizers and their aftereffect, as well as changes in soil properties under the influence of irrigation. At the same time, the total organic carbon content, C/N ratio, specific surface area, and rheological parameters were determined for the physical and chemical characteristics of soils. The results of the study showed that the hydrophilic-hydrophobic properties of the surface of the solid phase of soils, which largely determine the main structure-forming properties of soils, can be characterized by the value of the wetting edge angle. The CA of the studied soil samples varies from 32 degrees (highest wettability) to 45 degrees (lowest wettability). The lowest wettability is due to the increased content of hydrophobic compounds in the organic matter of soils and is characterized by the highest CA and is typical for native, untreated soil of the mowed steppe, which differs from other studied variants of the experiment in all explored physical and chemical parameters. Moldboard plowing as well as fallowing lead to changes in the physical and chemical properties of the soil and the qualitative composition of organic matter in the direction of their deterioration and a decrease in the CA. The use of mineral fertilizers contributes to the increase in the studied indicator mainly due to changes in plant productivity, in particular, the differences in CA are due to the impact of root secretions and plant residues on the soil properties. For the studied soils, the CA changes in the following series: mowed steppe > arable land with the mineral fertilizers application > arable land undergone the aftereffect of fertilizers. Correlation analysis revealed the relationship of CA with organic carbon content, specific surface area, and rheological characteristics of Chernozems. Thus, CA can serve as an integral indicator of changes in the physical and chemical properties of soils, their degradation changes under the conditions of different agricultural load. The method used in this research for determining CA requires a smaller

amount of sample compared to rheological methods and is generally more informative than determining the content of organic matter.

Keywords: wettability, hydrophilicity, hydrophobicity, contact angle of wetting, land use system.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации сельского хозяйства, а также при все возрастающем уровне антропогенного изменения ландшафтов встает вопрос о необходимости более глубокого изучения взаимосвязи химического состава и физических свойств почв и их изменения при различных воздействиях. Для оценки нативного состояния почв следует использовать интегральные физико-химические показатели объекта, измерение которых не влияет на естественное состояние почв. В качестве такого показателя предлагается использовать краевой угол смачивания, характеризующий гидрофобно-гидрофильные свойства поверхности твердой фазы почв и связанный с содержанием и качественным составом органического вещества в почве ([Милановский и др., 2005](#); [Милановский, 2009](#); [Bachmann, 2000](#)). Поверхностные свойства твердой фазы, такие как гидрофобность и гидрофильность, влияют на образование межчастичных контактов и типы образующихся структур ([Markgraf et al., 2006](#); [Хайдапова и др., 2016](#)). При этом в процессе гумификации/минерализации происходит трансформация органического вещества (ОВ), гидрофобно-гидрофильные свойства которого зависят от условий его образования, т. е. от количества воды и кислорода ([Aquino et al., 2011](#); [Милановский, Шеин, 2002](#)). Степень смачивания почв водой определяет большинство процессов, происходящих в почве, таких как скорость поверхностного стока, передвижение влаги в профиле почвы и доступность элементов питания для растений и биоты ([Воронин, 1975](#); [Шеин, 2005](#)). В работе ([Kraemer et al., 2019](#)) показано, что водоотталкивающая способность (а, следовательно, и обратное свойство – смачиваемость) является основным свойством, влияющим на стабилизацию структуры почвы, что определяет ее качество. Однако считать, что это прямая взаимосвязь, будет неправильно, т. к. на стабильность почвенных агрегатов влияют очень многие факторы, например, гранулометрический состав, количество и состав

органического вещества и минеральной части почвы ([Jaramillo, 2003](#); [Dlapa et al., 2004](#)). В ряде работ ([Wallis, Horne, 1992](#); [De Gryze et al., 2006](#)) отмечено повышение смачиваемости при увеличении доли минеральных компонентов, которые, в свою очередь, уменьшают площадь удельной поверхности, но такие закономерности прослеживаются не всегда ([Doerr et al., 2000](#); [Vogelmann et al., 2013](#)). Мерой смачивания твердых тел жидкостью является краевой угол ([Адамсон, 1979](#)). В зарубежной литературе используют термин – контактный угол смачивания (contact angles of wetting) ([Bahrani et al., 1973](#); [Carrillo et al., 1999](#); [Burghardt, 1985](#); [Bachmann, 2001](#); [Woche et al., 2005](#); [Yang et al., 2015](#)). Существует множество методов определения этого показателя ([Bahrani et al., 1973](#); [Doerr, 1998](#); [Papierowska et al., 2018](#)), но чаще всего в лабораторных условиях измерение краевого угла смачивания (КУС) проводят двумя основными методами – методом подъема капиллярной каймы (capillary rise, CRM) ([Adamson, 1990](#); [Liu, Wan, 2016](#)) или же методом сидячей капли (sessile drop method, SDM) ([Ryley, Khoshaim, 1977](#)). Последний метод часто применяют для определения гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности различных материалов ([Витязь и др., 1986](#); [Киселев и др., 2006](#)), однако, использование этого метода для характеристики почв имеет ряд сложностей. Точность и воспроизводимость результатов измерения КУС будет зависеть от толщины слоя образца, от степени его гомогенизации и равномерного нанесения на ровную поверхность, используемую в эксперименте. В качестве основы для нанесения почвенного образца некоторые исследователи используют двустороннюю клейкую ленту, закрепленную на предметном стекле ([Bachmann et al., 2000](#)) или на ткани ([Lamparter et al., 2010](#)), для более полного охвата образцом поверхности клейкой ленты. Однако этот способ не гарантирует равномерности и равномерной плотности распределения частиц по поверхности ленты. При этом на результаты могут влиять свойства самой клейкой ленты, применяющейся в качестве подложки, из-за недостаточно плотной упаковки частиц на ее поверхности ([Goebel et al., 2004](#)). Для снижения влияния на величину КУС свойств поверхности, на которую наносится образец, а также уменьшения количества образца предложена методика подготовки образцов путем высаживания

водных суспензий на предметные стекла ([Wu, 2001](#)). Однако таким образом сложно обеспечить необходимую толщину слоя анализируемого образца и избежать появления неоднородности при высушивании. Оценка точности и применимости разных методов пробоподготовки почвенных образцов к измерению КУС дана в работе ([Матвеева и др., 2019](#)). Авторами был предложен метод подготовки образцов почв с использованием мембранных фильтров, позволяющий снизить варьирование измеряемой величины и минимизировать количество используемого образца почвы, который и использовался в настоящем исследовании. В данной работе применялась методика пробоподготовки с использованием мембранных фильтров, т. к. при сравнении КУС почв одного генезиса особенно важно максимально снизить варьирование измеряемой величины, зависящее от способа пробоподготовки.

Предположение, что гидрофобно-гидрофильные свойства твердой фазы почв могут служить интегральным показателем почвенных свойств, основано на особенностях строения и формирования ОВ не только в процессе почвообразования на определенной территории, но и трансформации гидрофобно-гидрофильного состава гумусовых веществ (ГВ) *in situ* при изменении внешнего воздействия на почву. В данной работе мы исследовали чернозем природно-антропогенного ландшафта Каменная степь. Изменению гумусного состояния почв Каменной степи посвящено большое количество работ ([Кононова, Бельчикова, 1953](#); [Адерихин, Богатырева, 1974](#); [Зборищук, 2007](#)), особенно в последние годы ([Кузелев и др., 2007](#); [Когут и др., 2009](#); [Чевердин, Беспалов, 2011](#); [Лебедева и др., 2016](#); [Беспалов, и др., 2018](#); [Мамонтов, Соколовская, 2018](#)). По ним можно сформулировать следующие основные выводы:

- содержания гумуса в верхнем слое 0–20 см чернозема изменяется в следующем направлении – некосимая степь > лесополоса > пашня ([Зборищук, 2007](#));
- в большинстве исследованных черноземах тип гумуса гуматный, а в составе гуминовых кислот преобладает фракция, предположительно связанная с кальцием, что обусловлено увеличением карбонатности почв с глубиной ([Зборищук, 2007](#));
- потери гумуса за счет минерализации при вовлечении

обыкновенного чернозема в пашню достигают за 100 лет 30% в пахотном горизонте и 25% в полуметровой толще ([Кузелев и др., 2007](#));

- увеличение количества растительных остатков в совокупности с улучшением гидротермального режима интенсифицирует гумификацию, в результате которой возрастает доля гуминовых кислот, но при этом увеличивается и их подвижность, поэтому их часть перемещается в подпахотные горизонты. Подвижность ГВ определяется поведением в водной среде, что напрямую связано с гидрофобно-гидрофильными свойствами ГВ;

- система показателей гумусового состояния практически не фиксирует развитие негативной трансформации органической части орошаемых черноземов по сравнению с неорошаемыми. Однако состав и свойства их лабильных гумусовых веществ (ЛГВ) будет отличаться ([Мамонтов, Соколовская, 2018](#)). Имеющие для нас интерес гидрофобно-гидрофильные свойства ГВ будут зависеть от условий гумусообразования, доступа кислорода и воды в процессе минерализации ОВ, а также выноса подвижных гидрофильных компонентов из пахотного слоя вниз по профилю почвы.

Таким образом, состав ГВ чувствителен к видам и изменениям нагрузки, при этом любые изменения в строении гумусовых кислот повлияют на их амфифильные свойства. При изучении перестройки структуры гуминовых кислот в зависимости от способов обработки почвы ([Скрыльник и др., 2018](#)) исследователи уделяют особое внимание формам воды, находящейся в почве, а также соотношению и виду функциональных групп ГК. Показано, что влияние обработки почвы на устойчивость супрамолекулярной организации ГК определяется изменением условий гумификации, что обуславливает образование нестабильной водной структуры и отсутствие гидрофобного (неполярного) микроокружения лабильных гидрофильных ГВ ([Aquino et al., 2011](#)). Гидрофобные компоненты ГВ предохраняют новообразованные ГВ от микробиологической минерализации, тем самым сохраняя баланс гумуса ([Cihlár, et al., 2014](#)). Вспашка почвы приводит к увеличению содержания кислородсодержащих функциональных групп ГК (ОН– и С=О карбоксильных групп), что увеличивает реакционную активность

ГК. При этом отмечается стабилизация ГК преимущественно за счет Н-связей между кислородсодержащими группами ароматических структур, что вызывает гидрофильную гидратацию и увеличение содержания свободной воды. Интенсивное перемешивание пахотного слоя и доступ кислорода повышает микробную активность, что приводит к большей минерализации ГВ. Отсутствие вспашки снижает содержание кислорода и свободной воды в верхнем слое почвы, что приводит к увеличению в составе ГК неполярных ароматических (гидрофобных) структур и к снижению образования в составе ОВ лабильных доступных питательных веществ вследствие накопления трудноминерализуемого ОВ ([Скрыльник и др., 2018](#)). Поэтому изучение динамики изменения гидрофобно-гидрофильных свойств твердой фазы почв позволит отслеживать их деградационные изменения при антропогенной нагрузке.

Для того, чтобы охарактеризовать свойства изучаемых почв, определялось содержание ОВ, площадь удельной поверхности, а также реологические характеристики (модуль упругости в диапазоне LVE-range, диапазон линейной вязкоупругости, точка разрушения структуры Crossover), которые позволяют говорить об устойчивости почвы к нагрузкам, т. е. способности препятствовать деформационным изменениям и восстанавливаться после внешнего воздействия. Установление взаимосвязи КУС почв с содержанием органического вещества, площадью удельной поверхности и реологическими характеристиками позволит сделать выводы о возможности использования КУС в качестве интегрального показателя для оценки свойств и качества почв с целью регулирования антропогенной нагрузки.

Цель работы – с помощью измерения краевого угла смачивания выявить изменения свойств поверхности твердой фазы почв при различных системах землепользования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на образцах почв из слоя 0–20 см чернозема обыкновенного опытных полей ФГБНУ ВНИИСХ ЦЧП им. В.В.Докучаева Таловского района Воронежской области. Исследуемая почва, по классификации 1977 г. ([Егоров и др., 1977](#)), –

чернозем обыкновенный среднегумусный среднетощий глинистый на покровной карбонатной лессовидной глине; по классификации 2004 г. ([Шишов и др., 2004](#)), распахиваемые варианты относятся к агрочернозему; *Naptic Chernozem*, по WRB ([WRB, 2014](#)).

В тексте работы исследуемые почвы всех распахиваемых опытных участков будут называться “агрочерноземами”, а почва косимой степи – “степью”.

Исследованы образцы почв 9 делянок опытных полей, расположенных на территории природно-антропогенного ландшафта Каменная степь. По степени антропогенной нагрузки они разделяются на 3 группы:

- контрастные варианты – с минимальной агротехнической нагрузкой “Косимая степь” (более 100 лет); максимальной нагрузкой – бессменный “Черный пар” (с 1962 г.) и “Кукуруза бессменная” (с 1962 г.);

- варианты с постоянным внесением минеральных удобрений, в соответствии с требованием севооборота (действия), и

- после прекращения внесения (последствия) минеральных удобрений NPK.

В двух последних вариантах были выделены участки контроля без применения удобрений и участки с внесением одной и двух доз минеральных удобрений NPK. Опытный участок с применением удобрений до 2000 г. в течение 30 лет был орошаемым (участки последствия орошения обозначены буквой “о”). На участке действия удобрений шестипольный севооборот – черный пар, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, кукуруза. Образцы отобраны под сахарной свеклой в 2013 г. На участке последствия удобрений десятипольный севооборот – горох, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, кукуруза на зерно, горох, тритикале, просо, ячмень, кукуруза на зерно. Удобрения вносили с 1991 г. по 2009 г., образцы отобраны под кукурузой в 2013 г.

Исследуемые черноземы различаются характером и формой органического вещества, поступающего в горизонты профиля. Количество поступающего свежего органического вещества в верхнем слое 0–20 см почвы максимально в черноземе косимой степи, оно представлено остатками стеблей, корневыми остатками трав и продуктами их гумификация *in situ*. Почвы пашни характеризуют-

ся меньшим поступлением свежего органического вещества ввиду его изъятия с урожаем и ежегодной распашкой, в исследуемых образцах агрочернозема свежее органическое вещество представлено пожнивными остатками и опадом корней. В почву бесменного пара в течение периода более 40 лет растительные остатки не поступали.

По классификации Н.А. Качинского, пахотный горизонт исследуемых агрочерноземов имеет среднесуглинистый гранулометрический состав. Содержание физической глины в нем варьировало от 26 до 46%. Содержание ила имело меньшее варьирование, однако следует отметить, что на участках последействия орошения в пахотном слое чернозема наблюдалось повышенное содержание ила по сравнению с остальными делянками. Такое явление свойственно для орошаемых почв и подробно описано в работах многих исследователей ([Щеглов, 1995](#); [Королев, 2008](#); [Щеглов и др., 2013](#); [Горбунова, Куликова, 2017](#)).

Таким образом, основные отличия свойств почв исследуемых вариантов опыта обусловлены различием в обработке, применяемых севооборотах, внесении или прекращением применения удобрений, а также последствием орошения.

Аналитическая характеристика образцов почв включала содержание органического углерода, определяемое мокрым сжиганием методом Тюрина с титриметрическим окончанием ([Аринушкина, 1970](#)); общее содержание С и N – методом сухого сжигания на анализаторе Vario MAX CN в ЦКП Института Географии РАН. Пробоподготовка почв заключалась в их растирании до состояния пудры, затем проводилось взвешивание на микроаналитических весах нескольких мг с последующим запаиванием в металлических капсулах. Температура сжигания 1200 °С. Содержание С и N рассчитывалось по количеству выделившихся газов (CO₂ и NO). Погрешность измерения составляла < 0.5%; площадь удельной поверхности измерена по низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на анализаторе СОРБОМЕТР-М. Принцип работы прибора основан на использовании метода тепловой десорбции газа-адсорбата (азота) с поверхности образца в динамических условиях. Образцы почв предварительно были высушены под вакуумом при температуре 105 °С в течение 24 ч. Для уда-

ления с поверхности исследуемого материала поглощенных газов и паров перед началом испытаний проводилась дополнительная дегазация образца почвы за счет прогрева в стационарном потоке азота при температуре 105 °С. Образец проходил следующие этапы в ходе анализа:

- 1) установление заданного состава газовой смеси;
- 2) адсорбция газа-адсорбата на поверхности образца из потока газовой смеси при температуре равной -196 °С до установления равновесия между содержанием газа-адсорбата в газовой и адсорбционной фазах;
- 3) десорбция газа-адсорбата с поверхности образца в поток газовой смеси при нагревании образца до температуры полной десорбции газа-адсорбата (~100 °С).

Изменение в процессах адсорбции/десорбции объемной доли газа-адсорбата в газовой смеси регистрируется детектором по теплопроводности. По результатам измерений объема десорбированного газа, произведенных при различных составах газовой смеси, прибор производит расчет удельной поверхности исследуемого образца по методике одноточечного метода БЭТ.

Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3000 ([Yudina et al., 2018](#)).

КУС определяли методом статической сидячей капли ([Ryley, Khoshaim, 1977](#); [Burghardt, 1985](#)) на цифровом гониометре (Система Анализа Формы Капли, DSA100, Kruss, Германия), оснащенном видеокамерой. Метод позволяет получать значения КУС путем построения касательной в точке раздела трех фаз – вода, почва, воздух.

Метод сидячей капли заключается в помещении на ровную поверхность образца капли воды и измерении угла раздела фаз вода – поверхность. Эксперимент осуществляется по следующей схеме: из вертикально расположенной иглы выдавливается капля дистиллированной воды объемом 1.5 мкл, игла опускается вниз таким образом, что капля садится на образец, затем игла поднимается. Весь процесс регистрируется видеосъемкой.

Программное обеспечение позволяет анализировать форму капли на поверхности образца и вычислять значения КУС. Так как почва обладает высокой впитывающей способностью ([Shang et al.,](#)

2008), то КУС определяют по первому четкому кадру в момент посадки капли на образец и удаления иглы (рис. 1).

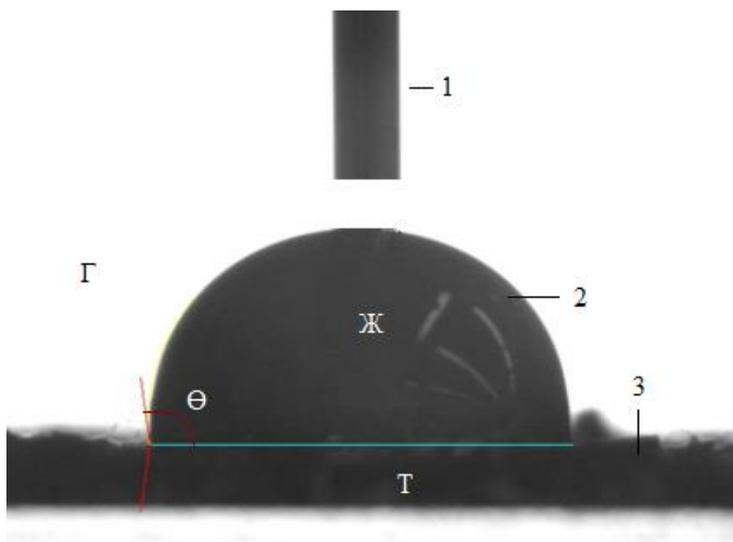


Рис. 1. Определение краевого угла смачивания. 1 – подающая жидкость игла; 2 – капля жидкости; 3 – исследуемый образец; Θ – краевой угол смачивания.

Fig. 1. Determination of contact angle. 1 –needle for drop delivery; 2 – a drop of liquid; 3 – the test sample; Θ – contact (wetting) angle.

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 составила 1.6 мг/см^2 . Данная методика (Матвеева и др., 2019) позволяет более чем в два раза снизить варьирование величины КУС по сравнению с применением двухсторонней клейкой ленты (Bachmann et al., 2000).

На исследуемых делянках было отобрано от 3 до 5 образцов, для каждого из которых подготовлено 2 мембранных фильтра с осажденной суспензией, количество измерений КУС на одном фильтре 6 и стандартное отклонение для каждого варианта землепользования рассчитано для 36–60 повторностей измерения. Стандартное отклонение измерений на одном мембранном фильтре составляло от 0.6 до 4.9, что соответствует точности, заявленной в работе ([Матвеева и др., 2019](#)).

Реологические свойства (модуль упругости в диапазоне LVE-range, диапазон линейной вязкоупругости, точка разрушения структуры Crossover) определяли методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 ([Markgraf et al., 2006](#); [Хайдапова и др., 2016](#)) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Испытуемый образец помещали на нижнее плато, верхнее плато опускали с нормальной силой давления < 5 N. Верхнее плато осуществляет колебательные движения с расширяющейся амплитудой колебаний в осцилляционном режиме. Параметры измерения: программа Start Rheoplus – режим Amplitude Sweep, количество точек измерения – 30, длительность измерения одной точки – 15 с, угловая частота измерения – 0.5 Гц, диапазон деформации (напряжения) γ от 0.001 до 100% Ig. Измерения проводили при постоянной температуре 20 °С ([Markgraf et al., 2006](#)). Подготовка почвенных паст осуществлялась следующим образом: образцы почвы растирали пестиком с резиновым наконечником и просеивали через сито $d = 1$ мм. Затем 3 г воздушно-сухого образца помещали в цилиндры с $d = 25$ мм, подобранные по размеру измерительной системы, выравнивая поверхность почвенной массы поршнем. Цилиндры с образцами ставили в установку с дистиллированной водой для капиллярного насыщения в течение суток. На рисунке 2 приведен пример получаемых результатов осцилляционного амплитудного теста.

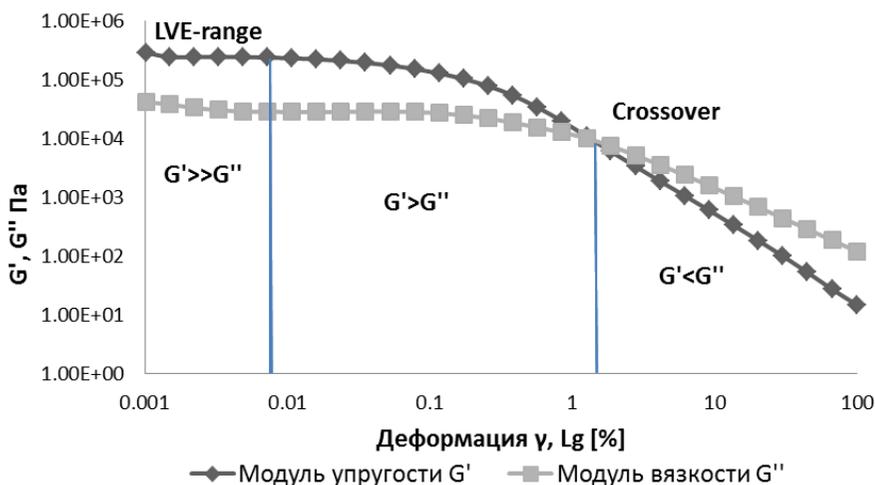


Рис. 2. Модуль упругости G' и модуль вязкости G'' чернозема (контрольный образец варианта действия удобрений и последствие орошения – K₀).

Fig. 2. Elastic modulus G' and viscosity modulus G'' of Chernozem (control sample of fertilizer action and irrigation aftereffect – K₀).

Метод амплитудной развертки позволил рассчитать следующие реологические характеристики почв:

1. Модуль упругости (G' , Па) – мера энергии деформации, сохраненная образцом во время процесса сдвига. После прекращения сдвигового усилия эта энергия действует как движущая сила для процесса восстановления полученных деформаций. Материалы, которые сохраняют полностью примененную энергию деформации, показывают поведение абсолютно обратимой деформации ([Mezger, 2011](#)).

2. Модуль потерь (G'' , Па) или вязкости – мера энергии деформации, израсходованная образцом во время сдвигового процесса. Эта энергия тратится во время процесса изменения структуры материала, т. е. движения между молекулами, группами, частицами. Трение между этими компонентами приводит к повышению температуры. Часть энергии подогревает образец, а другая

часть теряется в форме тепла в окружающую среду. Теряющие энергию материалы показывают необратимое деформационное поведение, или так называемое вязкое поведение ([Хайдапова и др., 2014](#)).

3. Диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range) – область упругого поведения, область параллельного оси x хода кривых модулей упругости и вязкости. При этом $G' \gg G''$. Предел диапазона по оси x (деформация, %) – величина деформации, после которой начинается понижение модуля упругости. Чем длиннее этот диапазон, тем устойчивее почвенная структура к нагрузкам ([Хайдапова и др., 2016](#)).

4. Величина модуля упругости G' в диапазоне линейной вязкоупругости характеризует прочность структурных связей в исследуемом образце.

5. Предел текучести (Crossover) или точка пересечения модулей $G' = G''$ указывает величину деформации, при которой деформационное поведение переходит от пластичновязкого к вязкому. После прохождения точки Crossover деформация становится необратима ([Mezger, 2011](#)).

Статистическая обработка результатов проводилась в программе STATISTICA10 (StatSoft, RU). Нормальность распределения величин КУС для каждого образца проверяли по критерию нормальности Колмогорова – Смирнова ([Lilliefors, 1967](#)). Значимость отличий определяли с помощью критерия Краскела-Уоллиса. Для анализа схожести свойств использовали метод главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Визуальное представление о различиях свойств чернозема разных вариантов опыта позволил получить метод главных компонент (рис. 3). Группирующая переменная – делянка; зависимые переменные – исследуемые свойства ($C_{орг}$, КУС, площадь удельной поверхности, модуль упругости, деформация LVE-range, деформация в точке разрушения структуры Crossover). Чем ближе между собой точки на графике, тем больше они схожи по совокупности изученных свойств. Отметим, что варианты опытов с действием и последствием удобрений четко отличаются между

собой, кроме того, отличаются также между собой и делянки контрольных опытов без внесения удобрений. Различия контрольных вариантов обусловлены, по всей видимости, разницей поступающего растительного материала в кормовом (вариант действия удобрений) и зерновом (вариантах последействия) севооборотах, а также изменением гранулометрического состава и гидрофобно-гидрофильных свойств ОВ под действием орошения. Разница совокупных свойств чернозема на делянках с внесением удобрений и контрольным участком, а также делянок последействия удобрений с соответствующим им контрольным участком обусловлены влиянием удобрений или же изменением нагрузки на почву при их отмене.

Делянки “Черного пара” и “Кукурузы бессменной” по совокупности свойств оказались ближе к варианту последействия удобрений. Из чего можно сделать вывод, что отмена внесения удобрений при севообороте сопоставима по нагрузке на почву в экстремальных вариантах опыта, таких как парование или бессменное выращивание монокультуры. Применение минеральных удобрений несколько приблизило свойства агрочернозема к чернозему “Косимой степи”.

По всей видимости, фактор 1 на рисунке 3 обуславливает обработку почвы, по этому фактору идет разделение делянок по наличию и отсутствию вспашки. Фактор 2 может показывать изменение свойств почв при различной нагрузке в виде применяемых севооборотов и удобрений. Так чернозем делянок с внесением удобрений оказался ближе по совокупности свойств к чернозему “Косимой степи”, в то время как отмена применения удобрений отдаляет по фактору 2 агрочернозем от почвы степи.

Результаты измерения КУС и содержания $C_{\text{орг}}$ (%) чернозема всех исследуемых делянок представлены на рисунке 4 и в таблице 1. Помимо определения содержания $C_{\text{орг}}$ для каждой делянки чернозема было определено среднее общее содержание С и N на анализаторе Vario MAX CN с целью расчета соотношения C/N.

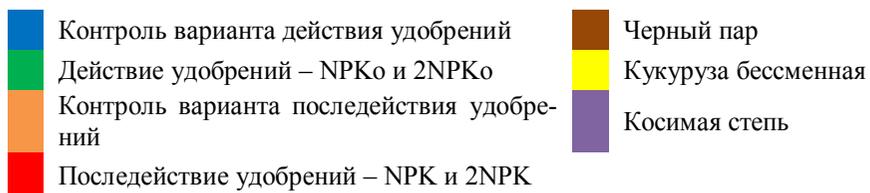
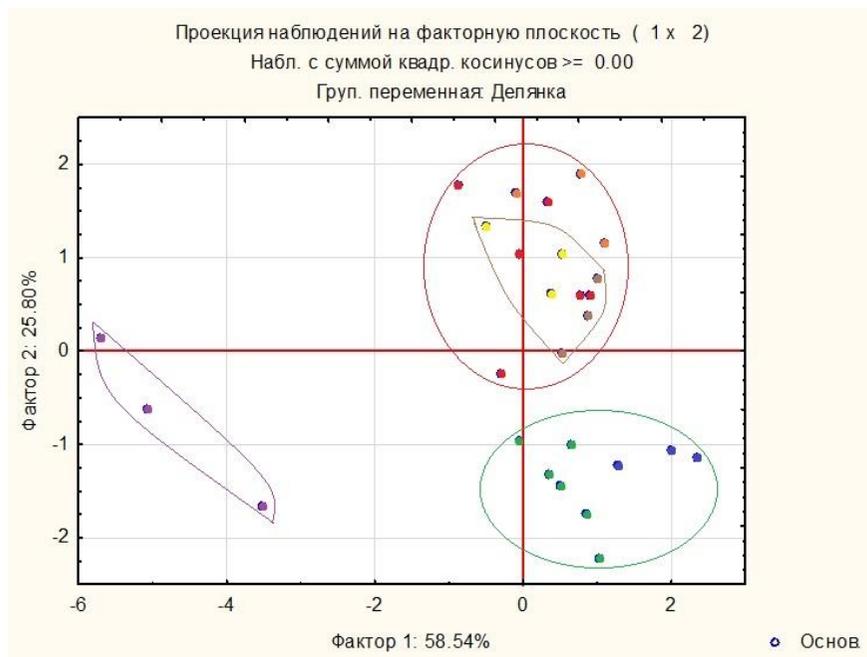


Рис. 3. Ординация делянок чернозема по методу главных компонент.
Fig. 3. Ordination of plots of Chernozem by principal component method.

Таблица 1. Содержание углерода и азота в слое 0–20 см чернозема
Table 1. Carbon and nitrogen content in the layer of 0–20 cm of Chernozem

Варианты опыта		C _{орг.} , %	C/N
Действие удобрений	Ко	3.8 + -0.2	11.5
	НПКо	4.0 + -0.2	11.7
	2НПКо	4.31 + -0.07	12.1
Последствие удобрений	К	4.0 + -0.2	12.2
	НПК	4.1 + -0.1	12.3
	2НПК	3.7 + -0.4	12.4
Контрастные варианты	Пар	3.9 + -0.6	12.2
	Степь	5.7 + -0.2	11.7
	Кукуруза	4.0 + -0.4	11.8

Примечание. Доверительный интервал рассчитан для уровня значимости $\alpha = 0.95$; о – последствие орошения.

Как видно из данных, представленных в таблице 1, чернозем пашни содержит приблизительно на 1/3 меньше углерода по сравнению с почвой степи, что согласуется с имеющимися представлениями (Кузелев и др., 2007). Помимо общего содержания С и N в почве важным является соотношение C/N, которое показывает степень обогащенности органического вещества азотом. Наиболее обогащено азотом органическое вещество чернозема степи, кукурузы бессменной, вариантов контроля и применения одной дозы НПК (C/N = 11.5–11.8), ОВ чернозема вариантов последдействия удобрений оказалось менее всего обогащено азотом (C/N = 12.1–12.4).

Влияние минеральных удобрений

Средние значения величины КУС чернозема опытных деленок Каменной степи варьировали от 32 до 45 градусов (рис. 4). Различия в системах землепользования и применении удобрений обуславливают изменение химического состава и физических свойств почв, что находит свое отражение в величине КУС.

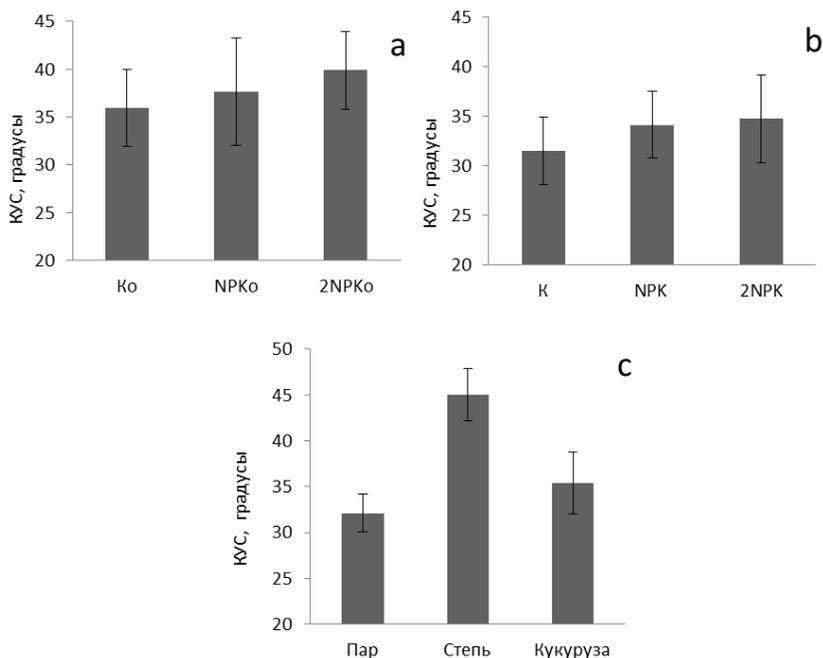


Рис. 4. Краевой угол смачивания исследуемых почв Каменной степи. а – действие удобрений, б – последствие удобрений, с – варианты контрастные. К – контроль, NPK и 2NPK – одна и две дозы вносимых минеральных удобрений соответственно.

Fig. 4. Contact angle of the studied soils of Kamennaya Steppe. а – effect of fertilizers, б – aftereffect of fertilizers, с – contrast variants. К – control, NPK and 2NPK – one and two doses of mineral fertilizers, respectively.

В вариантах опыта с применением минеральных удобрений (рис. 4а) наблюдается тенденция к увеличению угла смачивания, а значит и гидрофобности почв с увеличением дозы удобрений, однако пространственное варьирование исследуемого показателя не позволяет говорить о достоверности отличий между исследованными делянками.

Прекращение внесения минеральных удобрений (рис. 4б) способствует нивелированию различий КУС опытных участков с

одной и двумя дозами вносимых удобрений, а также участки последствий применения минеральных удобрений по смачиваемости уже через 4 года становятся близки по величине КУС к контролю. Что говорит о возвращении почв к исходному состоянию при отмене одного из факторов антропогенной нагрузки.

На гидрофобно-гидрофильные свойства почв влияют корневые выделения растений ([Moradi et al., 2012](#)), в работе ([Benard et al., 2018](#)) показана роль корневых экссудатов различных сельскохозяйственных культур, увеличивающих гидрофобность поверхности твердой фазы почв. На участках действия и последствий минеральных удобрений антропогенную нагрузку оказывает распашка, а используемые севообороты и внесение удобрений (или их отмена) может обуславливать разницу КУС этих вариантов опыта. Кроме того, участок действия удобрений ранее был орошаемым, что обуславливает разницу величины КУС на контрольных участках (рис. 4а, 4б). Как известно ([Милановский, Шейн, 2002](#)), условия гумификации, такие как доступ кислорода и воды, влияют на гидрофобно-гидрофильные свойства образующихся ГВ. При избытке кислорода образуются преимущественно гидрофильные ГВ, что чаще наблюдается в поверхностном слое почвы. При минерализации внутри минеральной массы на некоторой глубине наблюдается относительное накопление гидрофобных органических молекул. По всей видимости, более высокие значения величины КУС агрочернозема контрольного участка варианта последствий орошения (рис. 4а) указывают как на особенности гумификации *in situ*, так и на вымывание гидрофильных ГВ вниз по профилю.

На участке с контрастными вариантами опыта различия КУС почвы “Черного пара“ и “Кукурузы бессменной” могут определяться наличием/отсутствием растительных остатков и экссудатов корней кукурузы. Данное предположение согласуется с результатами исследования влияния корневых выделений сельскохозяйственных культур, в том числе и корневых выделений кукурузы, на гидрофобно-гидрофильные свойства 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. Корневые выделения кукурузы и растительные остатки, процессы их разложения и характерные для этого микробные сообщества, по всей видимости, и обуславливают различия в величинах КУС, определенных для участка “Черного пара” и “Кукурузы бессменной”.

Максимальные значения КУС наблюдались в почве “Косимой степи”, что может быть связано с большим содержанием органического вещества и активностью микроорганизмов ([Стахурлова и др., 2007](#)). Кроме того, почва степи, в отличие от агрочерноземов, характеризуется отсутствием нагрузки в виде вспашки, внесения удобрений и применения севооборотов. По всей видимости, свойства поверхности твердой фазы зависят от совокупности факторов.

Связь КУС с содержанием углерода

Почвы вариантов опыта с внесением минеральных удобрений характеризуются большими величинами КУС по сравнению с вариантами последействия удобрений (рис. 5), что свидетельствует об изменении свойств поверхности твердой фазы почв под действием удобрений. Внесение удобрений незначительно повлияло на содержание $C_{\text{орг.}}$ (%), и значимой корреляционной зависимости между КУС и содержанием $C_{\text{орг.}}$ (%) для этих вариантов опыта не выявлено. Большее влияние на содержание $C_{\text{орг.}}$ в слое 0–20 см агрочернозема оказывает характер обработки и использования. При анализе графика (рис. 5) может показаться, что есть прямая связь между содержанием $C_{\text{орг.}}$ и величиной КУС. Так, коэффициент детерминации для контрастных вариантов опыта был равен 0.92, однако эта связь кажущаяся, о чем говорит выброс точек, обозначающих делянки косимой степи, и полученный коэффициент детерминации не позволяет говорить о прямой корреляции между величиной КУС и содержанием $C_{\text{орг.}}$. Вместе с тем отчетливо видно, что агрочернозем распахиваемых участков резко отличается по совокупности своих свойств от почвы косимой степи.

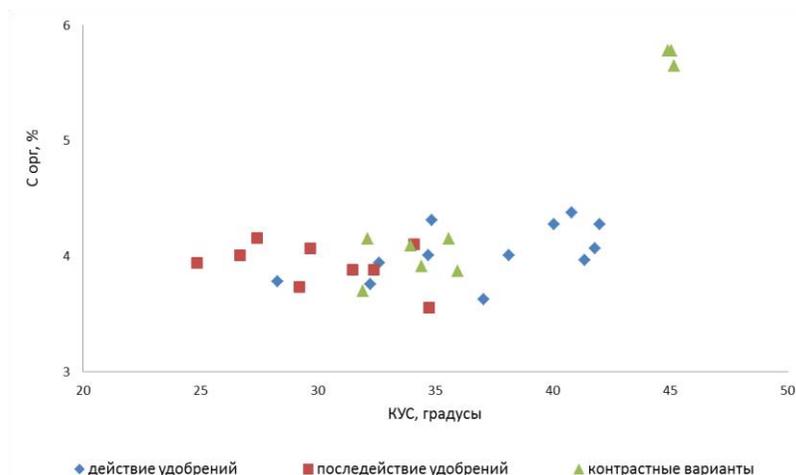


Рис. 5. КУС и содержание $C_{орг.}$ (%) в черноземе.
Fig. 5. The CA and $C_{org.}$ content in Chernozem.

Прямая линейная зависимость между величиной КУС и содержанием $C_{орг.}$ более 2% была обнаружена в ряде исследований (Ellerbrock et al., 2005; Bachmann et al., 2008; Hajnos et al., 2013; Haas et al., 2018). В работе (Kholodov et al., 2015) при изучении зависимости величины КУС дерново-подзолистой почвы и чернозема при различных системах землепользования установлено, что на величину КУС влияет не столько количество $C_{орг.}$, сколько характер расположения органического вещества на минеральной поверхности, зависящий от гранулометрического состава и системы землепользования. Проверка значимости отличий в содержании $C_{орг.}$ (%) в исследуемых делянках агрочернозема была проведена с помощью критерия Краскела – Уоллиса, который показал, что по содержанию углерода почва “Косимой степи” значительно отличается от почвы “Черного пара” и “Кукурузы бессменной”, а между самими последними вариантами отличий нет. Значимые отличия наблюдаются между участками с применением одной и двух доз минеральных удобрений, а также аналогичных участков варианта последствия удобрений (табл. 2. (А)).

Таблица 2. Значимость отличий содержания $C_{орг.}$ (%) и КУС почв
Table 2. Significance of differences in organic matter content and CA of soil

Варианты опыта		(A) $C_{орг.}$, %								
		Действие удобрений			Последствие удобрений			Контрастные варианты		
		Ко	NPКо	2NPКо	К	NPК	2NPК	Пар	Степь	Кукуруза
Действие удобрений	Ко		+	+	-	+	+	-	+	-
	NPКо	+		+	+	+	-	-	+	-
	2NPКо	+	+		+	+	+	+	+	+
Последствие удобрений	К	-	+	+		+	+	-	+	-
	NPК	+	+	+	+		+	-	+	-
	2NPК	+	-	+	+	+		-	+	-
Контрастные варианты	Пар	-	-	+	-	-	-		+	-
	Степь	+	+	+	+	+	+	+		+
	Кукуруза	-	-	+	-	-	-	-	+	

(Б) КУС, градусы										
Варианты опыта		Действие удобрений			Последствие удобрений			Контрастные варианты		
		К ₀	NPК ₀	2NPК ₀	К	NPК	2NPК	Пар	Степь	Кукуруза
Действие удобрений	К ₀	-	-		+	-	-	-	+	-
	NPК ₀	-		-	-	-	-	-	+	-
	2NPК ₀	-	-		-	+	+	+	+	-
Последствие удобрений	К	+	-	-		-	-	+	+	+
	NPК	-	+	+	-		-	-	+	-
	2NPК	-	-	+	-	-		-	+	-
Контрастные варианты	Пар	-	-	+	+	-	-		+	-
	Степь	+	+	+	+	+	+	+		+
	Кукуруза	-	-	-	+	-	-	-	+	

Примечание. Знак “+” – отличия значимы при уровне значимости $\alpha = 0.05$; знак “-” – значимых отличий нет.

Анализ значимости отличий величин КУС разных вариантов опыта показал, что почва степи отличается по этому показателю от всех других вариантов опытов. КУС почв под паром и бессменной кукурузой значимо не отличаются между собой (табл. 2 (Б)).

Выявленные отличия между вариантами опытов с внесением удобрений и с их последствием, включая разницу КУС контрольных вариантов этих опытов, говорят о том, что в данном случае ведущую роль играет не количество, а качественный состав органического вещества этих почв, связанный как с отличиями поступающего растительного материала в кормовом (для вариантов действия удобрений) и зерновом (в вариантах последствия) севооборотах (табл. 2 (Б)), так и с условиями гумификации под влиянием орошения.

Таким образом, само по себе содержание ОВ в почве не всегда имеет прямую взаимосвязь с гидрофобностью поверхности твердой фазы, определяющей величину КУС, что говорит о важности дальнейшего изучения этого вопроса. Одним из возможных механизмов, обуславливающих отсутствие взаимосвязи между $C_{орг.}$ и КУС, могут выступать различия в пространственной организации амфифильных органических соединений, сорбированных на поверхности минеральной фазы почв ([Kleber et al., 2007](#); [Bachmann et al., 2008](#)).

Связь КУС с площадью удельной поверхности агрочернозема

Между величиной КУС и площадью удельной поверхности по азоту (рис. 6) выявлена обратная взаимосвязь. Максимальные различия площади удельной поверхности установлены для наиболее контрастных вариантов почв – участок “Черного пара” и “Косимой степи” – 27.3 и 12.8 м²/г соответственно. При этом для вариантов действия (рис. 6а) и последствия (рис. 6б) минеральных удобрений НРК значимых отличий исследуемого показателя не наблюдается. Варьирование данной величины обусловлено содержанием ОВ и имеет обратную взаимосвязь с этим показателем. Коэффициент корреляции между содержанием $C_{орг.}$ и площадью удельной поверхности почв всех исследуемых участков составил 0.86. При этом для контрастных вариантов опыта $R = -0.9$, а для вариантов последствия минеральных удобрений $R = -0.7$.

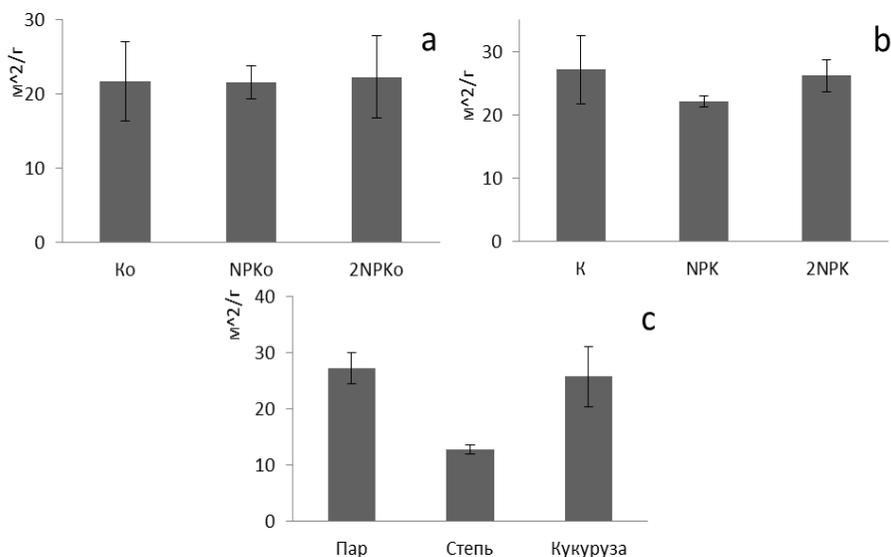


Рис. 6. Площадь удельной поверхности исследуемых почв Каменной степи. а – действие удобрений, б – последствие удобрений, с – варианты минимальной агротехнической нагрузки. К – контроль, NPK и 2NPK – одна и две дозы вносимых минеральных удобрений соответственно.

Fig. 6. Specific surface area of the studied soils of Kamennaya Steppe. а – effect of fertilizers, б – aftereffect of fertilizers, с – variants of minimum agrotechnical load. К – control, NPK and 2NPK – one and two doses of mineral fertilizers, respectively.

Взаимосвязь КУС с площадью удельной поверхности (рис. 7) показывает обратную зависимость, аналогичную связи КУС и содержания $C_{орг.}$ (%) (рис. 5), и подтверждает, что на величину КУС большее влияние оказывает система землепользования. Так для вариантов действия и последствия удобрений значимых корреляционных зависимостей между исследуемыми показателями не выявлено, однако при равном диапазоне значений $S_{уд.}$ КУС чернозема участков действия удобрений оказался выше, чем на участках последствия удобрений. Так же стоит отметить разли-

чие чернозема пашни от почвы косимой степи как по величине $S_{уд.}$, так и по величине КУС.

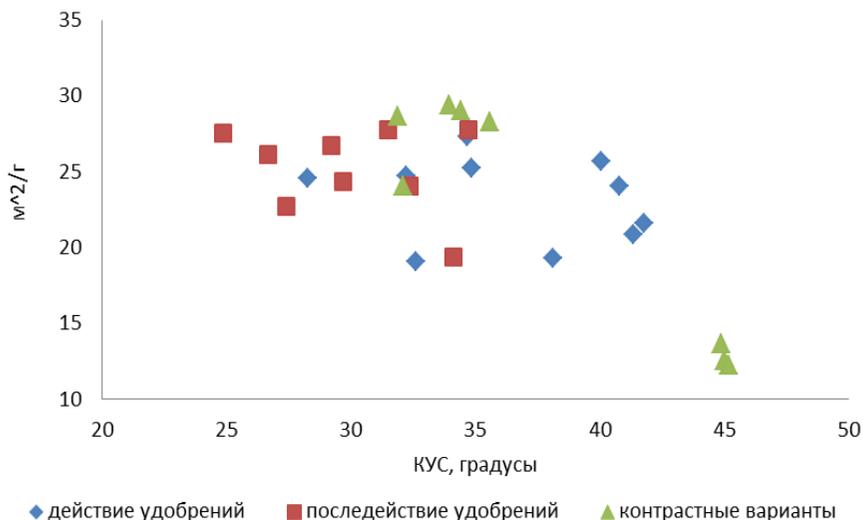


Рис. 7. Взаимосвязь между КУС и площадью удельной поверхности агрочернозема.

Fig. 7. The CA and specific surface area of agrochernozem.

Связь КУС с реологическими характеристиками агрочернозема

Методом амплитудной развертки в осцилляционном режиме на реометре MCR-302 определены следующие параметры: прочность межчастичных связей в начале эксперимента в области линейной вязкоупругости – начальный модуль упругости, диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range) или устойчивость почвенной структуры к нагрузкам, точка пересечения модулей упругости и вязкости (Crossover) или точка разрушения структуры. Точку пересечения модулей ($G' = G''$) рассчитывали с помощью программного обеспечения реометра.

Наименьший модуль упругости среди агрочерноземов разных вариантов опыта (рис. 8а, 8б, 8с) отмечен в почве “Косимой степи” и равен 138 кПа (рис. 8с), содержание $S_{\text{орг}}$ в которой составляет 5.7%. Для вариантов действия минеральных удобрений отмечается тенденция уменьшения величины G' кПа (рис. 8а), что говорит о снижении устойчивости почвы к нагрузкам при таком варианте использования.

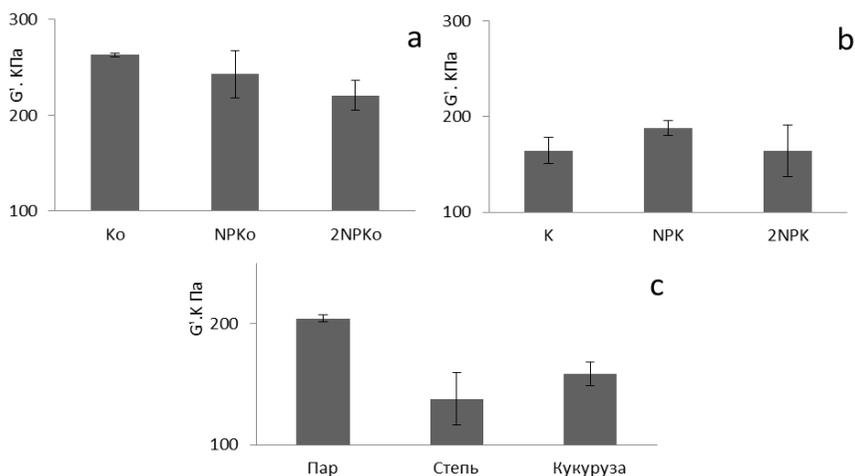


Рис. 8. Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости, G' , кПа. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. а – действие минеральных удобрений, б – последствие минеральных удобрений, с – контрастные варианты.

Fig. 8. Modulus of elasticity, G' , kPa. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. a – effect of mineral fertilizers, b – aftereffect of mineral fertilizers, c – contrast variants.

Несмотря на то что варианты последствия минеральных удобрений (рис. 8б) имеют значительно меньший модуль упругости, что, по всей видимости, связано с влиянием разных севооборотов, заложенных на этих вариантах опыта, и отсутствием орошения, о чем свидетельствуют различия модулей упругости контрольных вариантов (рис. 8а, 8б), достоверных отличий между делянками каждого варианта опыта не выявлено. Значимые отли-

чия наблюдаются только на делянках контрастных вариантов опыта (рис. 8с).

Динамика изменения модуля упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range чернозема различных вариантов опыта (рис. 8а, 8б, 8с) имеет обратную взаимосвязь с содержанием $C_{орг.}$ %. Это может быть связано с тем, что чем выше содержание ОВ в почве, тем большее количество воды поглощается в процессе увлажнения, что препятствует образованию близких контактов между частицами (Markgraf et al., 2012). В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции между содержанием $C_{орг.}$ (%) и реологическими показателями.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между $C_{орг.}$ (%) и реологическими характеристиками чернозема

Table 3. Correlation coefficients between $C_{орг.}$ (%) and rheological characteristics of Chernozem

Группировка вариантов опыта	R		
	Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range	Диапазон линейной вязкоупругости	Предел текучести (Crossover)
Все варианты опыта	-0.48	0.75	0.68
Действие удобрений	-0.98	0.21	0.86
Последствие удобрений	0.83	-0.72	-0.92
Контрастные варианты	-0.78	0.92	0.84

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Обратная корреляция между содержанием органического углерода и модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости выявлена для вариантов действия минеральных удобрений и

контрастных вариантов опыта, $R = -0.98$ и -0.78 соответственно. При большем содержании ОБ во время капиллярного насыщения образец чернозема способен удерживать большее количество воды, что приводит к уменьшению диапазона упругого поведения. Однако в варианте последействия удобрений между этими показателями наблюдается прямая взаимосвязь. Аналогичные противоположные зависимости отмечены для делянок контрастных вариантов опыта и вариантов последействия удобрений при выявлении корреляции между содержанием $S_{орг.}$ и диапазоном линейной вязкоупругости, между $S_{орг.}$ и пределом текучести. Различия в корреляционных взаимосвязях указывают на то, что реологические характеристики чернозема могут зависеть не только от количества, но и от качества поступающего в почву ОБ.

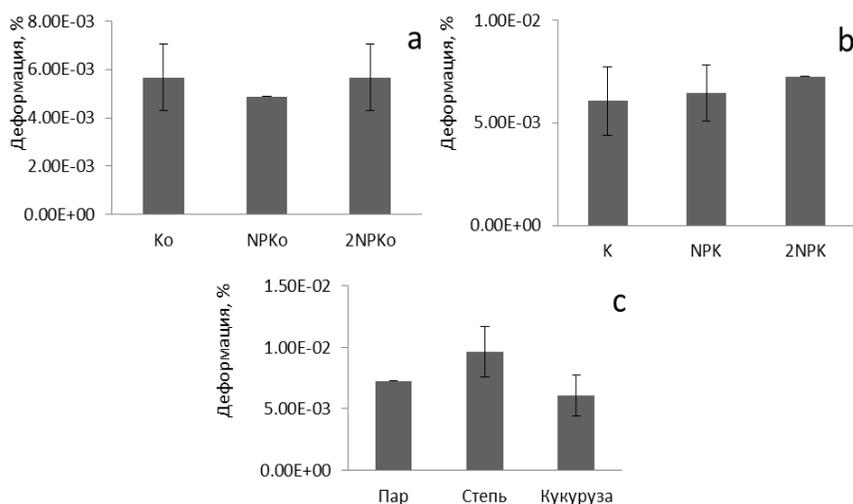


Рис. 9. Диапазон линейной вязкоупругости, %. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. а – действие минеральных удобрений, б – последействие минеральных удобрений, с – контрастные варианты.

Fig. 9. Range of linear viscoelasticity, %. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. a – effect of mineral fertilizers, b – aftereffect of mineral fertilizers, c – contrast variants.

Точка пересечения модулей $G' = G''$ указывает величину деформаций, при которой деформационное поведение переходит от пластичновязкого к вязкому. Максимальная величина деформации, при которой происходит разрушение структуры, равная 3.1%, наблюдается в почве с максимальным содержанием $C_{орг.}$ – в агрочерноземе “Косимой степи”. Коэффициент корреляции между пределом текучести и содержанием $C_{орг.}$ (%) для контрастных вариантов опыта равен 0.84 (табл. 3). Вариант действия удобрений показывает чуть большую взаимосвязь между исследуемыми показателями – $R = 0.86$.

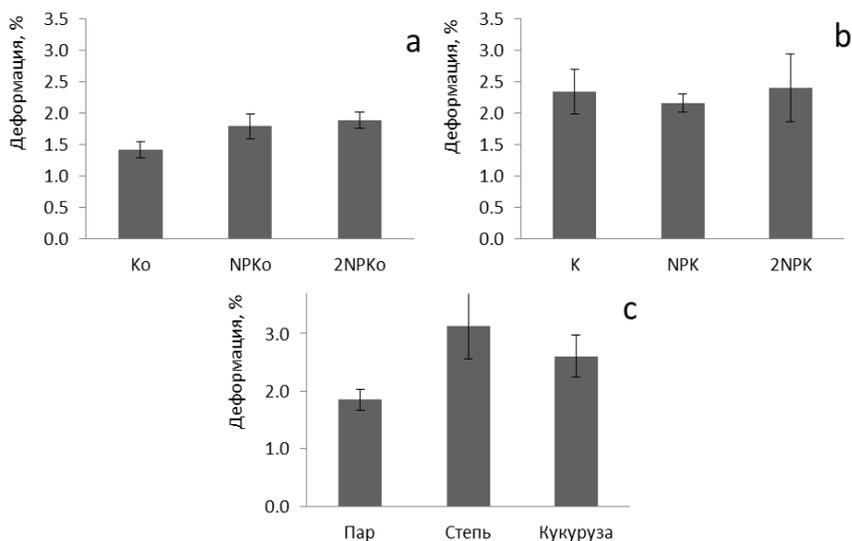


Рис. 10. Предел текучести (Crossover) или точка пересечения модулей. Стандартное отклонение рассчитано по 3 повторностям. а – действие минеральных удобрений, б – последствие минеральных удобрений, с – контрастные варианты.

Fig. 10. The yield point (Crossover) or intersection point of the modules. The standard deviation is calculated by 3 repetitions. а – effect of mineral fertilizers, б – aftereffect of mineral fertilizers, с – contrast variants.

Анализируя динамику изменения реологических показателей и значимость наблюдаемых отличий, можно прийти к выводу, что вид антропогенной нагрузки оказывает большее влияние на реологические свойства почв, чем ее интенсивность: на делянках вариантов действия и вариантов последействия минеральных удобрений значимых различий в реологических показателях между делянками не наблюдалось. Различия отмечены для почв пашни и степи. Сравнение реологических параметров черноземов разных вариантов опыта показало, что почвы, не подвергающиеся физическому воздействию в виде пахоты (“Косимая степь”) обладают большей устойчивостью к действию нагрузок. Повышенную устойчивость к нагрузкам обуславливает органическое вещество, что подтверждается работами многих исследователей ([Шеин Е.В. и др., 2002](#); [Markgraf et al., 2012](#); [Хайдапова и др., 2016](#)).

Устойчивость почвенной структуры зависит не только от количества ОВ, но и от соотношения гидрофобных и гидрофильных компонентов ГВ почв, динамику которых можно проследить путем измерения КУС. Реологические характеристики почв во многом определяются размером частиц, ОВ, содержанием Са и Fe. В нашем случае большее значение для исследуемого чернозема будет играть ОВ. В таблице 4 представлены коэффициенты корреляции между реологическими показателями и КУС. Значимые обратные взаимосвязи выявлены для вариантов действия удобрений и контрастных вариантов опыта при выявлении корреляции между КУС и модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range. Прямая корреляция отмечена между величиной КУС и диапазоном линейной вязкоупругости для варианта последействия удобрений и контрастных вариантов опыта. А также значимая положительная корреляция наблюдалась между величиной КУС и деформацией в точке разрушения структуры Crossover для вариантов действия удобрений и контрастных вариантов опыта.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между КУС и реологическими характеристиками агрочернозема

Table 4. Correlation coefficients between CA and rheological characteristics of agrochernozem

Группировка вариантов опыта	R		
	Модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range	Диапазон линейной вязкоупругости	Предел текучести (Crossover)
Все варианты опыта	-0.12	0.45	0.41
Действие удобрений	-0.98	0.07	0.92
Последствие удобрений	0.32	0.86	-0.12
Контрастные варианты	-0.89	0.84	0.93

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Полученные данные (табл. 4) говорят о том, что чем выше в исследуемом черноземе содержание гидрофобных компонентов в ОБ, тем лучше межчастичные взаимодействия, на что указывают положительные корреляции между КУС и диапазоном линейной вязкоупругости. Прямая корреляция между КУС и деформацией в точке разрушения структуры указывает на большую устойчивость почвенной структуры при более гидрофобной поверхности твердой фазы. Обратная корреляция между модулем упругости в диапазоне линейной вязкоупругости LVE-range и величиной КУС говорит о том, что, по всей видимости, чернозем, характеризующийся большей гидрофобностью при капиллярном насыщении, имел большее отталкивание между частицами в водной среде, что способствовало снижению диапазона упругого поведения.

Взаимосвязь исследуемых свойств чернозема указывает на закономерное изменение образующихся взаимодействий между частицами (реологические характеристики) и физических свойств поверхности ($S_{уд.}$, КУС) при изменении химического состава почв (содержание $C_{орг.}$ (%), поступление растительных остатков и присутствующие им микроорганизмы) и вида нагрузки (вспашка, применение удобрений).

Выявленные корреляционные взаимосвязи между величиной КУС и другими исследуемыми показателями (табл. 3, 4 и рис. 5, 7) подтверждают возможность использования краевого угла смачивания в качестве интегрального показателя при изучении динамики изменения свойств почв при различной антропогенной нагрузке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов свидетельствует, что гидрофильно-гидрофобные свойства поверхности твердой фазы почв, во многом определяющие основные структурообразующие свойства почв, зависят от большого числа факторов и их комбинаций. Эти свойства могут быть охарактеризованы величиной краевого угла смачивания. Наименьшая смачиваемость обусловлена повышенным содержанием гидрофобных соединений в составе органического вещества почв и характеризуется наибольшими величинами КУС. Такие высокие значения КУС характерны для нативной, не обрабатываемой почвы “Косимой степи”, которая отличается от других исследованных вариантов опыта по всем изученным физико-химическим показателям. Механическая обработка почвы в виде вспашки с оборотом пласта, парование приводят к изменениям физико-химических свойств почв в сторону их ухудшения и к снижению величины КУС. Помимо механической обработки на величину КУС большое влияние оказывает содержание и качественный состав органического вещества, который в свою очередь зависит от условий окружающей среды, т. е. от поступающих растительных остатков, доступа кислорода и воды. Почвы вариантов действия и последствия минеральных удобрений отличаются по характеру поступающего в них органического вещества, связанного с применением в них совершенно разных расте-

ний в севооборотах, а также их различие обусловлено длительным орошением участка действия удобрений. Все это объясняет различия в величинах КУС даже на контрольных участках этих вариантов опыта. Стоит отметить, что данные участки не имеют столь сильного различия по другим исследуемым показателям, при этом различия их совокупных свойств отражаются на изменении величины КУС.

Таким образом, КУС может служить интегральным показателем изменения физико-химических свойств почв, их деградационных изменений в условиях различной агрогенной нагрузки. Данный метод исследования требует меньшего количества образца по сравнению с реологическими методами и в целом более информативен, чем определение содержания органического вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адамсон А., Абидор И.Г., Дерягин Б.В.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
2. *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.
3. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
4. *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.
5. *Витязь П.А., Шелег В.К., Капцевич В.М.* Метод определения краевого угла смачивания в пористых порошковых материалах // Порошковая металлургия. 1986. № 4. С. 52–55.
6. *Воронин А.А.* Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв // Научные доклады Высшей школы, биологические науки. 1975. № 12. С. 7–15.
7. *Горбунова Н.С., Куликова Е.В.* Изменение физических и физико-химических свойств чернозема выщелоченного под влиянием дождевального орошения в условиях производственного использования почв свекловичного севооборота // Вестник Воронежского

государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2017. № 3. С. 47–52.

8. *Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М., Розов Н.И.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.

9. *Зборищук Ю.Н.* Особенности гумуса черноземов обыкновенных Каменной Степи // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2007. № 2. С. 3–9.

10. *Киселев М.Г., Савич В.В., Павич Т.П.* Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // Наука и техника. 2006 (1). С. 38–41.

11. *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. DOI: [10.19047/0136-1694-2009--41-49](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2009--41-49).

12. *Кононова М.М., Бельчикова Н.П.* Процессы превращения органических веществ в обыкновенном черноземе при применении комплекса Докучаева-Костычева-Вильямса // Вопросы травопольной системы земледелия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. Т. II. С. 303–360.

13. *Королев В.А.* Изменение основных физических свойств черноземов обыкновенных под влиянием орошения // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1234–1240.

14. *Кузелев М.М., Мамонтов В.Г., Сюняев Н.К., Свиридов А.К., Черенков В.В.* Гумусовое состояние обыкновенных черноземов естественно-антропогенного ландшафта Каменной Степи // Известия ТСХА. 2007. № 3. С. 38–46.

15. *Лебедева И.И., Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чеве́рдин Ю.И., Беспалов В.А.* Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института им. 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).

16. *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.

17. *Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Рогова О.Б.* Способ подготовки образцов почв для определения контактного угла смачивания методом сидячей капли // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. № 97. С. 91–112. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-91-112](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-91-112).

18. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 188 с.

19. *Милановский Е.Ю., Шеин Е.В.* Функциональная роль амфифильных компонентов гумусовых веществ в процессах гумусо-структурообразования и в генезисе почв // Почвоведение. 2002. № 10. С. 1201–1213.
20. *Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Русанов А.М., Засыпкина Д.И., Николаева Е.И., Анилова Л.В.* Почвенная структура и органическое вещество типичных чернозема Предуралья под лесом и многолетней пашней // Вестник Оренбургского государственного университета. 2005. № 2. С. 113–117.
21. *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.
22. *Стахурлова Л.Д., Свистова И.Д., Щеглов Д.И.* Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах // Почвоведение. 2007. № 6. С. 769–774.
23. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В.* Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 53–58.
24. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.
25. *Чеве́рдин Ю.И., Беспалов В.А.* Пространственное варьирование содержания гумуса в черноземах Каменной Степи // Плодородие. 2011. № 4. С. 28–29.
26. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: МГУ, 2005. 432 с.
27. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д.* Устойчивость почвенной структуры и органическое вещество почв // Роль почв в биосфере. Тр. ин-та почвоведения МГУ им. МВ Ломоносова и РАН. 2002. № 1. С. 129–151.
28. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
29. *Щеглов Д.И.* Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... докт. биол. наук, Воронеж, 1995. 46 с.
30. *Щеглов Д.И., Горбунова Н.С., Семенова Л.А., Хатунцева О.А.* Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной степи

различной степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 3. С. 282–290.

31. *Adamson A.* Physical chemistry of surfaces 5th edn. New York, NY John Wiley & Sons Inc. 1990. P. 379–420.

32. *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 modelling // Plant Soil. 2016. Vol. 407. Iss. 1–2. P. 161–171.

33. *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. No. 19. P. 8411–8419.

34. *Bachmann J.* Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles, J. Soil Sci. Plant Nutr., 2001, Vol. 1, P. 26–33.

35. *Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H.* Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency // Journal of Hydrology. 2000. Vol. 231. P. 66–75. DOI: [10.1016/S0022-1694\(00\)00184-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00184-0).

36. *Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R.* Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2008. Vol. 171. Iss. 1. P. 14–26.

37. *Bachmann J., Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R.* Extended methodology for determining wetting properties of porous media // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. No. 12. P. 14.

38. *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. Iss. 4. P. 532–534

39. *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. Iss. 1. P. 1–9.

40. *Burghardt W.* Determination of the wetting characteristics of peat soil extracts by contact-angle measurements // Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde. 1985. Vol. 148. No. 1. P. 66–72.

41. *Carrillo M.L.K., Letey J., Yates S.R.* Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils // Soil Science Society of America Journal. 1999. Vol. 63. Iss. 3. P. 433–436.

42. *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. P. 151–160.

43. *De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R.* Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture // *European Journal of Soil Science*. 2006. Vol. 57. Iss. 2. P. 235–246.
44. *Dlapa P., Doerr S., Lichner L., Sir M., Tesar M.* Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency // *Plant Soil and Environment*. 2004. Vol. 50. Iss. 8. P. 358–363.
45. *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*, 1998, Vol. 23, No. 7, P. 663–668. DOI: [10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199807\)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6).
46. *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. No. 1–4. P. 33–65. DOI: [10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).
47. *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. Iss. 1. P. 57–66.
48. *Goebel M.O., Bachmann J., Woche S.K., Fischer W.R., Horton R.* Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy // *Soil Science Society of America Journal*. 2004. Vol. 68. Iss. 2. P. 383–393.
49. *Haas C., Gerke H.H., Ellerbrock R.H., Hallett P.D., Horn R.* Relating soil organic matter composition to soil water repellency for soil biopore surfaces different in history from two Bt horizons of a Haplic Luvisol // *Ecohydrology*. 2018. Vol. 11. Iss. 6. P. 11.
50. *Hajnos M., Calka A., Jozefaciuk G.* Wettability of mineral soils // *Geoderma*. 2013. No. 206. P. 63–69.
51. *Jaramillo D.F.* Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula* // Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2003. 36 p.
52. *Jiménez J.J., Lorenz K., Lal R.* Organic carbon and nitrogen in soil particle-size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica – implications for within-site soil organic carbon stabilization // *Catena*. 2011. Vol. 86. Iss. 3. P. 178–191.
53. *Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Frid A.S., Lazarev V.I., Tyugai Z.N., Milanovskiy E.Y.* Contact angles of wetting and water stability of soil structure // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 6. P. 600–607.
54. *Kleber M., Sollins P., Sutton R.* A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces // *Biogeochemistry*. 2007. Vol. 85. No. 1. P. 9–24.

55. *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. No. 355. P. 113902.
56. *Lamparter A., Bachmann J., Woche S.K.* Determination of Small-Scale Spatial Heterogeneity of Water Repellency in Sandy Soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2010. Vol. 74. Iss. 6. P. 2010–2012.
57. *Lilliefors H.W.* On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American statistical Association*. 1967. Vol. 62. Iss. 318. P. 399–402.
58. *Liu Z., Yu X., Wan L.* Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. Iss. 1. P. 21–35.
59. *Markgraf W., Horn R., Peth S.* An approach to rheometry in soil mechanics—Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // *Soil Tillage Res.* 2006. Vol. 91. P. 1–14.
60. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R.* Influence of organic matter on rheological properties of soil // *Applied Clay Science*. 2012. Vol. 64. P. 25–33.
61. *Mezger T.* *The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers.* Hanover: Vincentz, 2011. 436 p.
62. *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. P. 8.
63. *Papierowska E., Matysiak W., Szatyłowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Łachacz A.* Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. P. 221–231. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.012).
64. *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. Iss. 2. P. 243–251.
65. *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.
66. *Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J.* Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? // *Catena*. 2013. Vol. 110. P. 24–31. DOI: [10.1016/j.catena.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.009).
67. *Wallis M., Horne D.* *Soil water repellency* // *Advances in soil science*. Springer. 1992. P. 91–146.
68. *Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Van der Ploeg R.R., Bachmann J.* Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land

management // *European Journal of Soil Science*. 2005. Vol. 56. Iss. 2. P. 239–251.

69. *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).

70. *Wu W.J.* Baseline studies of The Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and surface phenomena // *Clays and Clay Minerals*. 2001. Vol. 49. Iss. 5. P. 446–452.

71. *Yang S., Gong A.M., Wu J.H., Lu T.H.* Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil // *Rock and Soil Mechanics*. 2015. Vol. 36. Iss. 3. P. 674–678.

72. *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.

73. *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. Vol. 179. P. 294–302.

REFERENCES

1. Adamson A., Abidor I.G., Deryagin B.V., *Fizicheskaya khimiya poverkhnosti* (Physical chemistry of surfaces), Moscow: Mir, 1979, 568 p.
2. Aderikhin P.G., Bogatyreva Z.S., *Vozdeistvie zashchitnykh lesnykh nasazhdenii na sodержanie i sostav organicheskogo veshchestva obyknovennykh chernozemov Kamennoi Stepi* (The impact of protective forest stands on the content and composition of the organic matter of ordinary chernozems of the Stone Steppe), *Pochvovedenie*, 1974, No. 5, pp. 43–53.
3. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Chemical soil analysis guide), Moscow: MGU, 1970, 487 p.
4. Bepalov V.A., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., *Transformatsiya pochvennogo pogloshchayushchego kompleksa chernozemnykh pochv kamennoi stepi pri dlitel'nom postmeliorativnom vozdeistvii* (Transformation of the soil absorbing complex of chernozem soils of the stone steppe under prolonged post-reclamation impact), *Agrofizika*, 2018, No. 4, pp. 9–16.
5. Vityaz' P.A., Sheleg V.K., Kaptsevich V.M., *Metod opredeleniya kraevogo ugla smachivaniya v poristyykh poroshkovykh materialakh* (A method for determining the contact angle in porous powder materials), *Poroshkovaya metallurgiya*, 1986, No. 4, pp. 52–55.

6. Voronin A.A., Poverkhnostnye yavleniya v pochvakh i napravlennoe izmenenie svoystv pochv (Surface phenomena in soils and a directed change in soil properties), *Nauchnye doklady Vyssei shkoly, biologicheskie nauki*, 1975, No. 12, pp. 7–15.
7. Gorbunova N.S., Kulikova E.V., Izmenenie fizicheskikh i fiziko-khimicheskikh svoystv chernozema vyshchelochennogo pod vliyaniem dozhdaval'nogo orosheniya v usloviyakh proizvodstvennogo ispol'zovaniya pochv sveklovichnogo sevooborota (Change in the physical and physico-chemical properties of leached chernozem under the influence of sprinkling irrigation in conditions of industrial use of beet crop rotation soils), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2017, No. 3, pp. 47–52.
8. Egorov V.V., Ivanova E.N., Fridland V.M., Rozov N.I., Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR (Classification and soil diagnostics of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.
9. Zborishchuk Yu.N., Osobennosti gumusa chernozemov obyknovennykh Kamennoi Stepi (Features of humus of ordinary chernozems of the Kamennaya Steppe), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2007, No. 2, pp. 3–9.
10. Kiselev M.G., Savich V.V., Pavich T.P., Opredelenie kraevogo ugla smachivaniya na ploskikh poverkhnostyakh (Determination of the wetting angle on flat surfaces), *Nauka i tekhnika*, 2006, No. 1, pp. 38–41.
11. Kogut B.M., Titova N.A., Buleeva V.S., Antropogennaya transformatsiya kachestvennogo sostava gumusa chernozemov Kamennoi Stepi (Anthropogenic transformation of the qualitative composition of humus of chernozems of the Kamennaya Steppe), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2009, Vol. 64, pp. 41–49, DOI: [10.19047/0136-1694-2009-41-49](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2009-41-49).
12. Kononova M.M., Bel'chikova N.P., Protsessy prevrashcheniya organicheskikh veshchestv v obyknovennom chernozeme pri primenenii kompleksa Dokuchaeva-Kostycheva-Vil'yamsa (The processes of conversion of organic substances in ordinary chernozem when using the Dokuchaev-Kostychev-Williams complex), In: *Voprosy travopol'noi sistemy zemledeliya* (Issues of grass field farming system), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1953, Vol. II, pp. 303–360.
13. Korolev V.A., Izmenenie osnovnykh fizicheskikh svoystv chernozemov obyknovennykh pod vliyaniem orosheniya (Changes in the basic physical properties of ordinary chernozems under the influence of irrigation), *Pochvovedenie*, 2008, No. 10, pp. 1234–1240.
14. Kuzelev M.M., Mamontov V.G., Syunyaev N.K., Sviridov A.K., Cherenkov V.V., Gumusovoe sostoyanie obyknovennykh chernozemov estestvenno-antropogennogo landshafta Kamennoi Stepi (The humus state of

ordinary chernozems of the natural anthropogenic landscape of the Stone Steppe), *Izvestiya TSKhA*, 2007, No. 3, pp. 38–46.

15. Lebedeva I.I., Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Y.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 Stony 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).

16. Mamontov V.G., Sokolovskaya E.L., Elementnyi i molekulyarno-massovyi sostav labil'nykh gumusovykh veshchestv chernozema obyknovennogo kamennoi stepi (The elemental and molecular mass composition of labile humic substances of chernozem of ordinary stone steppe), *Izvestiya TSKhA*, 2018, No. 1, pp. 130–138.

17. Matveeva N.V., Milanovskii E.Yu., Rogova O.B., The method of preparing soil samples for soil – water contact angle measurement using sessile-drop technique, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 97, pp. 91–112, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-97-91-112](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-91-112).

18. Milanovskii E.Yu., *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* (Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds), Moscow: GEOS, 2009, 188 p.

19. Milanovskii E.Yu., Shein E.V., Funktsional'naya rol' amfifil'nykh komponentov gumusovykh veshchestv v protsessakh gumusostrukturnoobrazovaniya i v genezise pochv (The functional role of amphiphilic components of humic substances in the processes of humus structure formation and in the soil genesis), *Pochvovedenie*, 2002, No. 10, pp. 1201–1213.

20. Shein E.V., Rusanov A.M., Zasyapkina D.I., Nikolaeva E.I., Anilova L.V., Pochvennaya struktura i organicheskoe veshchestvo tipichnykh chernozemo Predural'ya pod lesom i mnogoletnei pashnei (The soil structure and organic matter of typical chernozems of the Urals under a forest and perennial arable land), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, No. 2, pp. 113–117.

21. Skryl'nik E.V., Shevchenko N.V., Popirnyi M.A., Nikolov O.T., Konformatsionnye perestroiki suprastruktury guminovykh kislot chernozema tipichnogo v zavisimosti ot sposobov obrabotki pochvy (Conformational rearrangements of the suprastructure of humic acids of chernozem typical depending on soil cultivation methods), *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*, 2018, Vol. 63, Iss. 2, pp. 209–221.

22. Stakhurlova L.D., Svistova I.D., Shcheglov D.I., Biologicheskaya aktivnost' kak indikator plodorodiya chernozemov v razlichnykh biotsenozakh (Biological activity as an indicator of the fertility of chernozems in various biocenoses), *Pochvovedenie*, 2007, No. 6, pp. 769–774.

23. Khaidapova D.D., Milanovskii E.Yu., Chestnova V.V., Otsenka reologicheskimi metodami vosstanovleniya struktury pochv pod vliyaniem vyrashchivaniya lesopolos na antropogenno narushennykh pochvakh (Evaluation by rheological methods of restoration of soil structure under the influence of growing forest belts on anthropogenically disturbed soils), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 6, pp. 53–58.
24. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii (Rheological properties of typical chernozems (Kursk region) with different land use), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963.
25. Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Prostranstvennoe var'irovanie soderzhaniya gumusa v chernozemakh Kamennoi Stepi (Spatial variation of the humus content in chernozems of the Kamennaya Steppe), *Plodorodie*, 2011, No. 4, pp. 28–29.
26. Shein E.V., Kurs fiziki pochv (Soil physics course), Moscow: MGU, 2005, 432 p.
27. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Khaidapova D.D., Ustoichivost' pochvennoi struktury i organicheskoe veshchestvo pochv (Stability of the soil structure and organic matter of soils), In: *Rol' pochv v biosfere. Trudy in-ta pochvovedeniya MGU im. MV Lomonosova i RAN*, 2002, No. 1, pp. 129–151.
28. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of Russian soils), Smolensk: Oikumena, 2004. 341 p.
29. Shcheglov D.I., *Chernozemy tsentra Russkoi ravniny i ikh evolyutsiya pod vliyaniem estestvennykh i antropogennykh faktorov: Avtoref. dis. ... doct. biol. nauk* (Chernozems of the Center of the Russian Plain and their Evolution under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors, Extended abstract of cand. biol. sci. thesis), Voronezh, 1995, 46 p.
30. Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A., Mikroelementy v pochvakh sopryazhennykh landshaftov Kamennoi stepi razlichnoi stepeni gidromorfizma (Microelements in the soils of the associated landscapes of the Kamennaya Steppe of varying degrees of hydromorphism), *Pochvovedenie*, 2013, No. 3, pp. 282–290.
31. Adamson A., *Physical chemistry of surfaces 5th edn*, New York, NY John Wiley & Sons Inc, 1990, pp. 379–420.
32. 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 modelling, *Plant Soil*, 2016, Vol. 407, Iss. 1–2, pp. 161–171.

33. 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, No. 19, pp. 8411–8419.
34. Bachmann J., Contact angle and surface charge of wettable and hydrophobic silt particles, *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2001, Vol. 1, pp. 26–33.
35. Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H., Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency, *Journal of Hydrology*, 2000, Vol. 231, pp. 66–75, DOI: [10.1016/S0022-1694\(00\)00184-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00184-0).
36. Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R., Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, Vol. 171, Iss. 1, pp. 14–26.
37. Bachmann J., Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Extended methodology for determining wetting properties of porous media, *Water Resources Research*, 2003, Vol. 39, No. 12, p. 14.
38. 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, Iss. 4, pp. 532–534.
39. 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, Iss. 1, pp. 1–9.
40. Burghardt W., Determination of the wetting characteristics of peat soil extracts by contact-angle measurements, *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 1985, Vol. 148, No. 1, pp. 66–72.
41. Carrillo M.L.K., Letey J., Yates S.R., Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils, *Soil Science Society of America Journal*, 1999, Vol. 63, Iss. 3, pp. 433–436.
42. 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.
43. De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R., Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture, *European Journal of Soil Science*, 2006, Vol. 57, Iss. 2, pp. 235–246.
44. Dlapa P., Doerr S., Lichner L., Sir M., Tesar M., Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency, *Plant Soil and Environment*, 2004, Vol. 50, Iss. 8, pp. 358–363.
45. 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, 1998, Vol. 23, No. 7, pp. 663–668, DOI: [10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199807\)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6).

46. 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, No. 1–4, pp. 33–65, DOI: [10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).

47. 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, Iss. 1, pp. 57–66.

48. Goebel M.O., Bachmann J., Woche S.K., Fischer W.R., Horton R., Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, Vol. 68, Iss. 2, pp. 383–393.

49. Haas C., Gerke H.H., Ellerbrock R.H., Hallett P.D., Horn R., Relating soil organic matter composition to soil water repellency for soil biopore surfaces different in history from two Bt horizons of a Haplic Luvisol, *Ecohydrology*, 2018, Vol. 11, Iss. 6, p. 11.

50. Hajnos M., Calka A., Jozefaciuk G., Wettability of mineral soils, *Geoderma*, 2013, No. 206, pp. 63–69.

51. Jaramillo D.F., *Effect of soil drying temperature on water repellence in Andisols under Pinus patula cover*, Research report, National University of Colombia, Medellin, 2003, 36 p.

52. Jiménez J.J., Lorenz K., Lal R., Organic carbon and nitrogen in soil particle-size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica – implications for within-site soil organic carbon stabilization, *Catena*, 2011, Vol. 86, Iss. 3, pp. 178–191.

53. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Yashin M.A., Frid A.S., Lazarev V.I., Tyugai Z.N., Milanovskiy E.Y., Contact angles of wetting and water stability of soil structure, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 6, pp. 600–607.

54. Kleber M., Sollins P., Sutton R., A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces, *Biogeochemistry*, 2007, Vol. 85, No. 1, pp. 9–24.

55. 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, No. 355, p. 113902.

56. Lamparter A., Bachmann J., Woche S.K., Determination of Small-Scale Spatial Heterogeneity of Water Repellency in Sandy Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2010, Vol. 74, Iss. 6, pp. 2010–2012.

57. Lilliefors H.W., On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown, *Journal of the American statistical Association*, 1967, Vol. 62, Iss. 318, pp. 399–402.
58. Liu Z., Yu X., Wan L., Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils, *Acta Geotechnica*, 2016, Vol. 11, Iss. 1, pp. 21–35.
59. Markgraf W., Horn R., Peth S., An approach to rheometry in soil mechanics—Structural changes in bentonite, clayey and silty soils, *Soil Tillage Res.*, 2006, Vol. 91, pp. 1–14.
60. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R., Influence of organic matter on rheological properties of soil, *Applied Clay Science*, 2012, Vol. 64, pp. 25–33.
61. Mezger T., *The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz, 2011, 436 p.
62. 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, p. 8.
63. Papierowska E., Matysiak W., Szatyłowicz J., Debaene G., Urbanek E., Kalisz B., Łachacz A. Compatibility of methods used for soil water repellency determination for organic and organo-mineral soils, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 221–231, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.012).
64. 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, Iss. 2., pp. 243–251.
65. 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.
66. Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J., Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena*, 2013, Vol. 110, pp. 24–31, DOI: [10.1016/j.catena.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.009).
67. Wallis M., Horne D., Soil water repellency, *Advances in soil science*, Springer, 1992, pp. 91–146.
68. Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Van der Ploeg R.R., Bachmann J., Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management, *European Journal of Soil Science*, 2005, Vol. 56, Iss. 2, pp. 239–251.
69. *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).

70. Wu W.J., Baseline studies of The Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and surface phenomena, *Clays and Clay Minerals*, 2001, Vol. 49, Iss. 5, pp. 446–452.
71. Yang S., Gong A.M., Wu J.H., Lu T.H., Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil, *Rock and Soil Mechanics*, 2015, Vol. 36, Iss. 3, pp. 674–678.
72. 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.
73. 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, Vol. 179, pp. 294–302.