

УТОЧНЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ

Д.А. Ушкова¹, И.В. Горепекин¹, Г.Н. Федотов^{1✉}, Ю.П. Батырев²

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения МГУ

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Агрегатный состав почв и водоустойчивость агрегатов связаны с органическим веществом почв, его количеством и качеством, но до сих пор не существует удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи. Цель работы — проверка значимости влияния расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв и уточнение представлений о механизме данного свойства. Оценку водоустойчивости почв проводили авторским методом лезвий. Проведенная проверка показала, что его корреляция с методом мокрого просеивания по Саввинову, проведенная на 17 образцах почв, превышает 85 %. В ходе экспериментов установлено, что при контакте агрегатов с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается. Снижение водоустойчивости при контакте с водой принято объяснять расклинивающим давлением воды. Проведенные эксперименты по замене воды на растворы соли при капиллярном увлажнении агрегатов не подтвердили эту теорию. Поэтому при помощи растрового электронного микроскопа был проверен раствор, полученный после капиллярного контакта агрегатов с водой. Установлено, что при капиллярном контакте агрегатов с водой туда выделяется лабильная части гуминовых веществ. Таким образом, водоустойчивость почвенных образцов при контакте с водой снижается за счет выхода гуминовых веществ и уменьшения количества структурообразующих связей в агрегате.

Ключевые слова: водоустойчивость и органическое вещество почв, расклинивающее давление воды, влияние температуры на водоустойчивость, дифильность органического вещества почв

Ссылка для цитирования: Ушкова Д.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Батырев Ю.П. Уточнение представлений о механизме водоустойчивости почв // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 78–86. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-78-86

Одним из ключевых требований, предъявляемых к почвам при возделывании на них сельскохозяйственных растений, является их структурное состояние. Почвы, имеющие агрономически ценную структуру, обладают некоторыми важными физическими свойствами: рыхлостью, облегчающей прорастание семян и развитие из них растений [1], благоприятным для развития растений водно-воздушным и тепловым режимами, противозерозионной устойчивостью [2, 3]. Они сохраняются лишь в том случае, когда почвы способны противостоять разрушающему действию воды [4, 5] и агротехнологическим воздействиям, т. е. быть водо- и механически устойчивыми [6–9]. Такие типы устойчивости почв определяют количество и прочность внутриагрегатных связей [7], обеспечивающих в определенном диапазоне влажности существование почвенных агрегатов в нераздельном, едином состоянии. По-видимому, оба вида устойчивости почвенных агрегатов определяются прежде всего существованием некоторых почвенных «клеев» [2, 10], имеющих органическую природу и позволяющих сохранять устойчивость почвенных агрегатов при водном и механическом воздействиях.

В работах [7, 11] указано, что агрегатный состав почв и их водоустойчивость связаны с наличием в почвах органического вещества, его количеством и качеством. Тем не менее, до сих пор нет удовлетворительных объяснений механизмов этой взаимосвязи. Кроме того, устойчивость структуры определяется наличием в почвах ионов Ca, Al, Fe, доли коллоидных компонентов, а также действием таких живых организмов, как растения, грибы, микроорганизмы и их экссудатов [10–16].

По данным литературных источников [17], водоустойчивость почв связана с их гидрофобностью, т. е. количеством (плотностью) гидрофобных связей. Согласно предложенному в работах [18, 19] механизму, гидрофильные участки гуминовых веществ (ГВ) взаимодействуют с глинистыми минералами, а гидрофобные — между собой, связывая почвенные частицы в агрегат и обеспечивая водо- и механическую устойчивость почвенной структуры. Следует отметить, что эта точка зрения имеет недостатки, поскольку имеются в виду абстрактные ГВ, не имеющие размера и формы. Указывается, что они должны входить в состав почвенных гелей, но не рассматривается в каком виде они там находятся

Сравнительная характеристика почвенных образцов

Comparative characteristics of soil samples

Номер образца	Классификация почв СССР, 1977	Горизонт	Средневзвешенный диаметр агрегатов (СВД), мм	Предельная нагрузка на агрегат, мН/агрегат
1	Агродерново-подзолистая	Апах	0,125 ± 0,021	23,3 ± 2,3
2	Дерново-подзолистая	Апах	0,304 ± 0,051	17,5 ± 1,7
3	То же	Апах	0,392 ± 0,066	17,6 ± 1,7
4	«→»	Апах	0,161 ± 0,027	19,0 ± 1,9
5	Серая лесная освоенная	Апах	0,654 ± 0,111	28,1 ± 2,5
6	Чернозем выщелоченный	Апах	0,868 ± 0,147	36,1 ± 3,6
7	Каштановая	А	0,163 ± 0,028	19,9 ± 1,9
8	Серозем типичный	А	0,443 ± 0,075	16,2 ± 1,1
9	Красно-коричневая (красноцветная)	А (0–7)	3,935 ± 0,667	51,8 ± 1,2
10	То же	В (7–22)	3,497 ± 0,592	42,2 ± 1,4
11	«→»	ВС (62–85)	0,933 ± 0,158	3,3 ± 1,5
12	Бурозем	Апах	0,961 ± 0,163	33,7 ± 1,3
13	Чернозем типичный	А	0,927 ± 0,157	31,2 ± 0,5
14	То же	Апах	0,982 ± 0,166	34,7 ± 0,9
15	Дерново-подзолистая	Апах	0,386 ± 0,065	13,7 ± 0,4
16	Горно-луговая	А(10–30)	0,999 ± 0,325	35,1 ± 1,0
17	Бурозем	А	1,920 ± 0,169	39,5 ± 1,1

и какие физические механизмы определяют их положение в гелях. На эти вопросы частично отвечает модель почвенных гелей, возникающих и существующих в почвах в виде надмолекулярных образований — фрактальных кластеров — с размером частиц 100...200 нм, образующихся из первичных частиц ГВ размером 2...10 нм [20]. Однако четкой концепции о природе устойчивости почвенных агрегатов, доказанной экспериментами, в настоящий момент в почвоведении нет.

Есть и другое мнение о механизме формирования водоустойчивых агрегатов. По А.А. Шинкареву [21], почвенные отдельные частицы представляют собой совокупность частиц, связанных между собой свежими слабо разложившимися органическими остатками, которые выполняют армирующую функцию. По данным экспериментов, исследователи показали, что в наиболее агрегированных почвах содержание гидрофильных компонентов ГВ повышено [22].

В литературе также отмечается, что при отсутствии растительных остатков в почве в ней устанавливается минимальное содержание гумуса [23]. По мнению исследователей, устойчивая структура почвы формируется при оптимальном содержании именно лабильной, быстро минерализуемой части гумуса [24].

Таким образом, пока не существует единых представлений о механизме формирования водоустойчивости почв.

Высказывается предположение, что к факторам, снижающим водоустойчивость почв,

относится расклинивающее давление воды, а механизм разрушения внутриагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между частицами почвы. Согласно физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, устойчивость и неустойчивость дисперсных систем, к которым относятся и почвы, определяется соотношением сил притяжения и отталкивания между частицами [25]. В основе данного явления лежит осмотическая составляющая, обусловленная перекрытием диффузных атмосфер двойных электрических слоев, существующих на границах жидкой прослойки и твердой фазы почвы. Однако проверки воздействия расклинивающего давления воды на водоустойчивость почвенных агрегатов в литературе нами обнаружено не было.

Цель работы

Цель работы — проверка значимости влияния расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв и уточнение представлений о механизме данного свойства.

Объекты и методы исследования

В работе были использованы образцы, представленные в табл. 1. Результаты определения водоустойчивости почвенных агрегатов по методу Саввинова сравнивали с результатами, полученными методом «лезвий».

В ходе исследования использовали метод «лезвий», основанный на рассечении лезвием близких

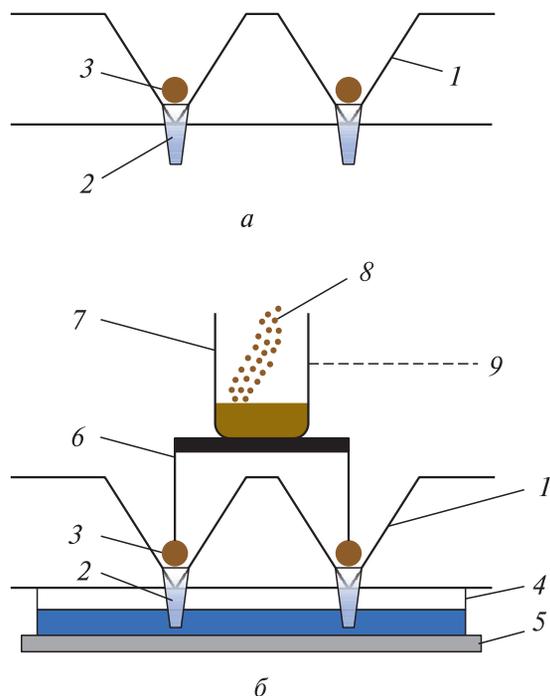


Рис. 1. Схема кассеты с фитилями и агрегатами для определения устойчивости почвенных агрегатов (а): 1 — уголки кассеты; 2 — хлопчатобумажные фитили; 3 — почвенные агрегаты; общая схема определения устойчивости почвенных агрегатов (б): 1 — уголки кассеты; 2 — хлопчатобумажные фитили; 3 — почвенные агрегаты; 4 — емкость с водой; 5 — весы; 6 — площадка с закрепленными на ней лезвиями; 7 — мерный стаканчик с песком; 8 — добавляемый в мерный стаканчик песок; 9 — луч лазера, направленный на мерную шкалу стаканчика

Fig. 1. Scheme of the cassette with wicks and aggregates for determining the stability of soil aggregates (a): 1 — corners of the cassette; 2 — cotton wicks; 3 — soil aggregates; general scheme of determining the stability of soil aggregates (b): 1 — corners of the cassette; 2 — cotton wicks; 3 — soil aggregates; 4 — container with water; 5 — scales; 6 — platform with blades fixed on it; 7 — measuring cup with sand; 8 — sand added to the measuring cup; 9 — laser beam directed to the measuring cup scale

к насыщению водой агрегатов и определении предельного напряжения их разрушения [26].

При подготовке образцов агрегаты почв полевой влажности (0,7 относительно наименьшей влагоемкости) просеивали через сито с диаметром ячеек 4,5...5,0 мм и высушивали до воздушно-сухого состояния. Было установлено, что получение агрегатов просевом высушенных или влажных (с последующим высушиванием) образцов не оказывает значительного влияния на их устойчивость.

В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой три пары алюминиевых уголков, закрепленных таким образом, чтобы угол был ориентирован по направлению действия силы тяжести (рис. 1, а).

В нижней части уголка размещены фитили из хлопчатобумажной ткани.

В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов так, чтобы они касались один другого. Количество агрегатов, укладываемых в уголки, лимитировалось размерами емкости для вакуумирования.

Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении, равном 15 кПа. Условия были подобраны в ходе изучения водоустойчивости агрегатов в предварительных экспериментах. В качестве изученных параметров при удалении воздуха из агрегатов выступали время вакуумирования и величина разрежения. Проведенные эксперименты показали, что при времени вакуумирования 15 мин и величине разрежения 15 кПа удается минимизировать разрушающее влияние защемленного воздуха, т. е. значения водоустойчивости становятся постоянными.

Кассету с агрегатами в вакуумируемом эксикаторе закрепляли на трех парах мощных неодимовых магнитов так, чтобы магнитами, находящимися снаружи эксикатора, можно было перемещать кассету внутри эксикатора: вверх-вниз.

После удаления воздуха из агрегатов кассету перемещали в эксикаторе так, чтобы фитили пришли в контакт с водой, и агрегаты в вакууме через фитили капиллярно увлажнялись до значений, близких к насыщению. При проверке влияния действия расклинивающего давления воды на водоустойчивость эксикатор наполняли растворами солей разной концентрации. Ввиду неодинаковой смачиваемости агрегатов различных почвенных типов для каждого из них время капиллярного увлажнения подбирали индивидуально. Так, для образцов черноземов, например, время увлажнения составило 30 мин, для серой лесной и дерново-подзолистой почв — 15 мин.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом, чтобы фитили под агрегатами обеспечивали сохранение насыщения их водой, достигнутое на этапе вакуумирования.

В связи с тем, что образец был насыщен водой через фитили без прямого контакта с ней, агрегаты самопроизвольно не разрушались благодаря стягивающим капиллярным силам.

Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия (см. рис. 1, б), закрепленные на площадке, на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой. Добавляя песок в стаканчик, повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали с помощью весов. Для исключения ошибок на

мерную шкалу стаканчика направляли луч лазера, закрепленный на другом штативе. Это позволяло хорошо контролировать процесс прохождения лезвиями средней части агрегатов.

В целях стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиютонах на агрегат (мН/агрегат).

Для проверки корректности результатов, полученных новым методом, было проведено измерение водоустойчивости тех же образцов методом ситового просеивания в стоячей воде по Саввинову [27].

Для изучения влияния воздействия воды на водоустойчивость при отсутствии механического воздействия [28] образец вакуумировали и капиллярно насыщали в течение 1, 2, 3, 19 ч, после чего определяли водоустойчивость методом «лезвий».

Для обнаружения выходящих из почвенных агрегатов частиц агрегаты располагали на хлопчатобумажной ткани, натянутой на круг диаметром 10 см, вырезанный из пластиковой крышки для банок. Причем с круга из крышки в воду свисали фитили из хлопчатобумажной ткани длиной примерно 5 см. Данному устройству было присвоено название «паук». На ткань помещали 3–4 десятка агрегатов размером 4–5 мм. Устройство «паук» помещали в эксикатор и вакуумным насосом откачивали из него воздух при разрежении, равном 15 кПа, в течение 15 мин. Используя магнитные манипуляторы, фитили находящихся в вакууме устройств, приводили в контакт с водой. Через 20...30 мин агрегаты намокали. Затем отключали вакуум и переносили «пауков» в стаканы, обеспечивая контакт фитилей с находящейся в стаканах водой.

Воду, которая могла содержать частицы, вышедшие из агрегатов, разбавляли в 10 раз и наносили по 5 мкл на атомно-гладкую поверхность слюды и высушивали. Далее перед исследованием на образцы напыляли золото с помощью установки JFC-1600 (фирма JEOL, Япония). Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе JEOL-6060A (фирма JEOL, Япония) с вольфрамовым катодом при ускоряющем напряжении 2...5 кВ.

С помощью микроскопа РЭМ JEOL-6060A был проведен рентгенолокальный анализ частиц, выделяющихся из почвенных агрегатов в воду. Для этого создавали многослойную конструкцию из этих частиц, последовательно нанося на слюду раствор, содержащий частицы, и высушивая.

Для проверки влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры после капиллярного увлажнения агрегатов и их вакуумирования кассету с образцами размещали под инфракрасной лампой для нагревания. Для пре-

дотвращения высыхания агрегатов капиллярный контакт с водой температурой 50...70 °С продолжали поддерживать. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры.

Результаты и обсуждение

Для проверки соответствия получаемых методом «лезвий» данных водоустойчивости агрегатов, определяемой классическим методом Саввинова эксперименты провели на 17 образцах (см. табл. 1). В результате было установлено, что полученные на одних и тех же образцах почв данные (см. табл. 1), хорошо коррелируют между собой. Коэффициент корреляции между определенным по методу Саввинова средневзвешенным диаметром (СВД) и предельной нагрузкой разрушения по методу «лезвий» превышает 85 % (рис. 2).

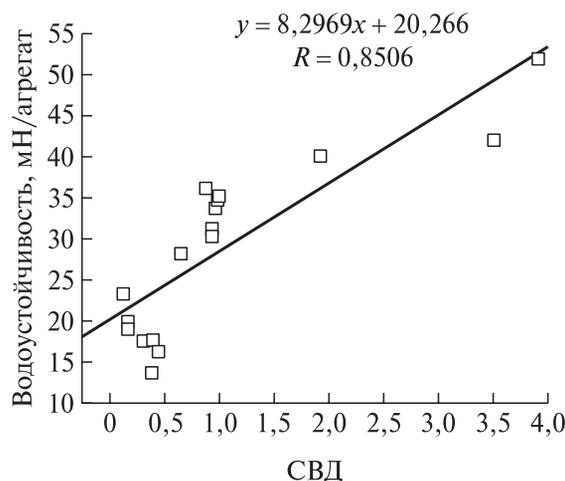


Рис. 2. Зависимость устойчивости агрегатов, определенной по методу «лезвий» (мН/агрегат), от водоустойчивости (средневзвешенного диаметра), установленной по методу Саввинова

Fig. 2. Dependence of aggregate stability determined by the «blade» method (mN/aggregate) on water resistance (weighted average diameter) determined by the Savvinov method

Для проверки влияния расклинивающего давления воды на определяемую водоустойчивость чернозема, серой лесной и дерново-подзолистой почв было проведено определение данного показателя в растворах солей разных концентраций. Использование солей увеличивает ионную силу раствора, что минимизирует перекрытие двойных электрических слоев на границе раздела фаз и уменьшает влияние расклинивающего давления воды. При значимом влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость образцов почв при таком методе определения должна была бы превышать их водоустойчивость, измеренную в воде, однако различий мы не обнаружили (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Водоустойчивость почвенных агрегатов, помещенных в воду и водный раствор хлорида калия (мН/агрегат), определенная методом «лезвий»

Water stability of soil aggregates placed in water and potassium chloride aqueous solution (mN/aggregate), determined by the «blade» method

Почва	Вода	0,1 н раствор хлорида калия	1 н раствор хлорида калия
Дерново-подзолистая	23,75 ± 0,86	23,71 ± 1,32	23,87 ± 1,55
Серая лесная	28,12 ± 2,49	27,67 ± 0,93	27,31 ± 0,77
Чернозем типичный	34,73 ± 0,88	34,32 ± 1,37	34,10 ± 1,33

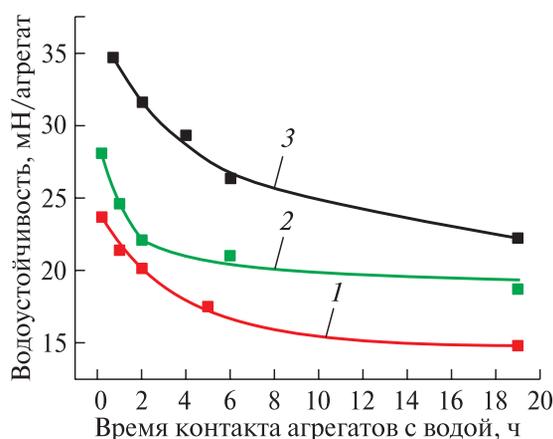


Рис. 3. Зависимость водоустойчивости почвенных агрегатов от времени их контакта с водой: 1 — дерново-подзолистая почва; 2 — серая лесная почва; 3 — чернозем

Fig. 3. Dependence of water resistance of soil aggregates on the time of their contact with water: 1 — sod-podzolic soil; 2 — grey forest soil; 3 — chernozem

Этот факт может свидетельствовать о том, что, несмотря на привычность представлений о значимом влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость почв, они не соответствуют действительности.

Как отмечено выше, наиболее распространено представление о механизме водоустойчивости в виде модели, основанной на гидрофобном взаимодействии участков амфифильных молекул гуминовых веществ [19, 20], обладающих мозаичной гидрофильно-гидрофобной поверхностью. Если анализировать полученные экспериментальные данные исходя из этой модели, гидрофильные и гидрофобные участки на поверхности частиц гумусовых веществ чередуются, но указанное выше увеличение размера ионных атмосфер около гидрофильных участков не влияет на взаимодействие частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки.

Поскольку гидрофильные и гидрофобные участки в молекулах гуминовых веществ пространственно не разъединены, объяснить отсутствие влияния увеличения размера ионных атмосфер на водоустойчивость можно только дальнедействием гидрофобных сил [29]. Расчеты, представленные в работе Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева [30], показывают, что для частиц размером 100 нм действие расклинивающего давления воды простирается на 15...20 нм, а в работе О.И. Виноградовой [29] приводятся данные о распространении действия гидрофобных сил до 100 нм.

Это хорошо объясняет возникшее противоречие между наличием в почвах расклинивающего давления воды и отсутствием его влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов, что, однако, не позволяет понять причину водоустойчивости почв.

А.Р. Декстер отметил, что при контакте агрегатов с водой их водоустойчивость уменьшается [28]. Для проверки полученных им экспериментальных данных было принято решение, используя метод «лезвий», изменять время капиллярного контакта агрегатов с водой перед определением их водоустойчивости. Было изучено влияние времени взаимодействия агрегатов почв различных типов с водой на величину их водоустойчивости (рис. 3).

Из полученных в ходе эксперимента данных следует, что при увеличении времени контакта агрегатов всех изученных почв с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается, что подтверждает результаты, полученные А.Р. Декстером [28]. Следовательно, вода без механического воздействия некоторым образом влияет на водоустойчивость почвенной структуры.

Поскольку полученные результаты не объясняют это, предположили, что влияние могут оказывать некие частицы, вышедшие из агрегатов в раствор.

Для проверки такого предположения с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) изучили воду, с которой контактировали почвенные агрегаты, так как она могла содержать эти частицы.

На микрофотографиях хорошо видны частицы сферической формы, выделившиеся из чернозема, дерново-подзолистой и серой лесной почв (рис. 4, а–в). По литературным данным пришли к предварительному заключению о том, что эти частицы ни что иное, как надмолекулярные образования гумусовых веществ. Рентгенолокальный анализ показал, что в составе Ф-кластеров содержится 95 % углерода. Мы пересчитали результаты на содержание гумусовых компонентов и получили 97 % содержания в них углерода, являющегося основой почвенных гелей [19].

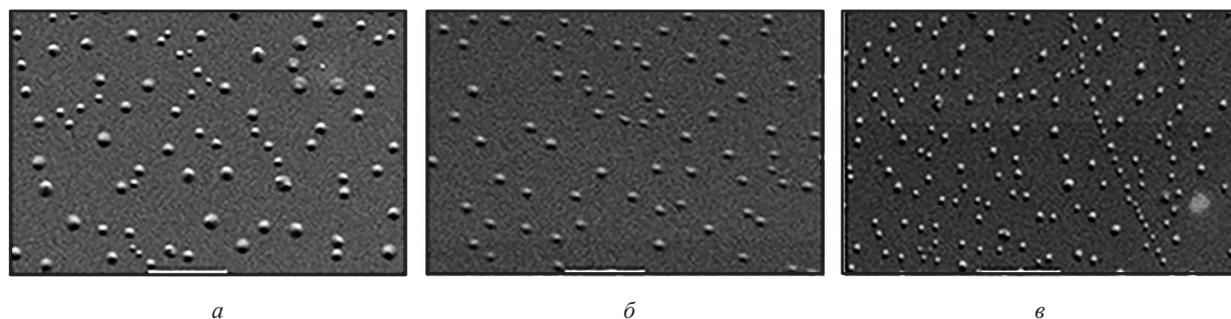


Рис. 4. Ф-кластеры, перешедшие в воду через хлопчатобумажную ткань в течение 19 ч при контакте с агрегатами чернозема (а), серой лесной (б) и дерново-подзолистой почв (в); увеличение $\times 5000$, масштабный отрезок равен 5 мкм
Fig. 4. F-clusters transferred to water through cotton cloth during 19 h in contact with aggregates of chernozem (a), grey forest soil (б) and sod-podzolic soil (в); magnification $\times 5000$, scale segment equal to 5 μm

Таким образом, водоустойчивость почвенных образцов при контакте с водой снижается за счет выхода гумусовых частиц и, по-видимому, уменьшения количества внутриагрегатных связей.

Для уточнения представлений о механизме водоустойчивости был дополнительно проведен эксперимент по изучению влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры. Для проверки влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры после капиллярного увлажнения агрегатов и их вакуумирования кассету с образцами размещали под инфракрасной лампой для их нагревания. Для предотвращения высыхания агрегатов, капиллярный контакт с водой с температурой 50...70 °С продолжали поддерживать. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры. Если именно гидрофобные связи обеспечивают прочность агрегатов, то при определении водоустойчивости при повышенных температурах водоустойчивость должна возрастать [14, 17].

Эксперименты показали, что для почв, не подвергавшихся высушиванию, характерно увеличение водоустойчивости их агрегатов. Однако при остывании агрегатов их водоустойчивость снижается до начальных значений. Это подтверждает предположение о том, что в основе механизма водоустойчивости почв, не подвергавшихся высушиванию, лежит взаимодействие между гидрофобными участками амфифильных молекул гумусовых веществ, обладающих мозаичной поверхностью.

При определении водоустойчивости воздушно-сухих агрегатов при повышенных температурах, данный показатель оставался неизменным, что позволяет предположить важное значение как гидрофобных, так и гидрофильных связей. При повышении температуры прочность гидрофобных связей должна расти, а гидрофильных — снижаться, поэтому отсутствие влияния температуры можно трактовать как результат совместного влияния на водоустойчивость гидрофильных и гидрофобных связей.

Из полученных данных следует, что для водоустойчивости почв важное значение имеют совместно действующие внутрипочвенные гидрофильные и гидрофобные связи, что объединяет представления разных исследователей о механизме их водоустойчивости.

Выводы

1. В ходе экспериментов не подтверждены литературные данные о влиянии расклинивающего давления воды на водоустойчивость почвенной структуры.
2. Установлено, что при контакте с водой почвенных агрегатов из них выделяются частицы органического вещества. Этот процесс сопровождается снижением водоустойчивости почвенных агрегатов.
3. Обнаружено увеличение водоустойчивости образцов, не подвергавшихся высушиванию, определяемой при повышенных температурах. Это говорит о гидрофобной природе структурообразующих связей во влажных почвах.
4. Не обнаружено увеличения водоустойчивости воздушно-сухих образцов, определяемой при повышенных температурах. Это говорит об изменении структурообразующих связей в воздушно-сухих образцах почв.

Список литературы

- [1] Lamichhane J.R., Debaeke P., Steinberg C., You M.P., Barbetti M.J., Aubertot J.N. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework // *Plant and soil*, 2018, v. 432, pp. 1–28.
- [2] Haydu-Houdeshella C-A., Grahamb R.C., Hendrix P.F., Peterson A.C. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California // *Geoderma*, 2018, v. 320, pp. 201–208.
- [3] Mao J., Nierop K.G.J., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review // *J. of Soils and Sediments*, 2019, v. 19, pp. 171–185.

- [4] Иванова О.И., Бураков Д.А. Эрозия почв. Красноярск: Изд-во Красноярского государственного аграрного университета, 2020. 103 с.
- [5] Рычкова М.И. Водопрочность почвы и урожайность озимой пшеницы в зависимости от способа основной обработки и предшественника на эрозионно-опасном склоне // Живые и биокосные системы, 2020. № 31. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-31/article-4> (дата обращения 15.02.2023).
- [6] Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования М.: Издательство Академии наук СССР, 1958. 188 с.
- [7] Николаева Е.И. Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям: дис. ... канд. биол. наук МГУ. М., 2016. 104 с.
- [8] Ghezalbash E., Hossein Mohammadi M., Shorafa M. Investigation of Soil Mechanical Resistance Threshold Values for Two Wheat Cultivars in a Loamy Sand Soil // J. of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, v. 22, pp. 1–12.
- [9] Schjøninga P., Lamandéa M., Munkholma L.J., Lyngvig H.S., Nielsen J.Aa. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils // Soil and Tillage Research, 2016, v. 163, pp. 298–308.
- [10] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehndorff E., Mikutta R., Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils // J. of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [11] Verchot L.V., Dutaur L., Shepherd K.D., Albrecht A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils // Geoderma, 2011, v. 161(3–4), pp. 182–193.
- [12] García-González I., Quemada M., Gabriel J.L., Alonso-Ayuso M., Hontoria C. Legacy of eight year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants // J. of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, v. 181, no. 6, pp. 818–826.
- [13] Lucas M., Schlüter S., Vogel H.J., Vetterlein D. Soil structure formation along an agricultural chronosequence // Geoderma, 2019, v. 350, pp. 61–72.
- [14] Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon // Biogeochemistry, 2018, v. 137, no. 1–2, pp. 27–49.
- [15] Song R., Liu L., ChunSheng W., LiYan M. Effect of soybean root exudates on soil aggregate size and stability // J. of Northeast Forestry University, 2009, v. 37, no. 7, pp. 84–86.
- [16] Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Kobernick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time // European J. of Soil Science, 2017, v. 68, no. 6, pp. 806–816.
- [17] 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, v. 110, pp. 24–31.
- [18] Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
- [19] Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение, 2003. № 1. С. 3–61.
- [20] Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Возможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях // Почвоведение, 2012. № 8. С. 908–920.
- [21] Шинкарев А.А., Мельников Л.В., Зайнуллин Т.Е. Природа водопрочности агрегатов гумусовых горизонтов темно-серой лесной почвы // Почвоведение, 1999. № 3. С. 348–353.
- [22] Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б. Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы // Почвоведение, 1997. № 2. С. 165–172.
- [23] Когут Б.М. Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение, 1998. № 7. С. 794–802.
- [24] Когут Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение, 2003. № 3. С. 308–316.
- [25] Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение, 2013. № 2. С. 3–34.
- [26] Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И., Шейн Е.В., Федотов Г.Н. Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристик // Почвоведение, 2023. № 2. С. 203–210.
- [27] Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- [28] Dexter A.R., Horn R., Kemper W. Two mechanisms of age hardening // J. Soil Sci., 1988, v. 39, pp. 163–175.
- [29] Виноградова О.И. Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2000. 175 с.
- [30] Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.

Сведения об авторах

Ушкова Дарья Александровна — студентка факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Горепекин Иван Владимирович — научный сотрудник Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», decembrist96@yandex.ru

Федотов Геннадий Николаевич  — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. факультета почвоведения МГУ, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», gennadiy.fedotov@gmail.com

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), batyrev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023.

Одобрено после рецензирования 22.03.2024.

Принята к публикации 22.03.2024.

CLARIFICATION OF CONCEPTS ABOUT SOIL WATER STABILITY MECHANISM

D.A. Ushkova¹, I.V. Gorepekin¹, G.N. Fedotov^{1✉}, Yu.P. Batyrev²

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The aggregate composition of soils and the water stability of aggregates are related to soil organic matter, its quantity and quality, but so far there is no satisfactory hypothesis explaining the mechanisms of this relationship. The purpose of the work is to verify the significance of the wedging water pressure influence on soil water stability and clarify ideas about the mechanism of this phenomenon. The assessment of soil water stability was carried out by the author's method of blades. The conducted verification showed that its correlation with the Savvinov wet sieving method carried out on 17 soil samples exceeds 85 %. During the experiments, it was found that when the units come into contact with water, their water stability decreases exponentially. The decrease in water stability in contact with water is usually explained by the wedging water pressure. Our experiments on replacing water with salt solutions during capillary humidification of aggregates did not confirm this theory. Therefore, using a scanning electron microscope, we tested the solution obtained after capillary contact of the aggregates with water. It was found that during capillary contact of aggregates with water, a labile part of humic substances is released there. Thus, the water stability of soil samples in contact with water is reduced due to the release of HS and a decrease in the number of structure-forming bonds in the aggregate.

Keywords: water stability and organic matter of the soil, wedging water pressure, temperature effect on water stability, diphilicity of soil organic matter

Suggested citation: Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Batyrev Yu.P. *Utochnenie predstavleniy o mekhanizme vodoustoychivosti pochv* [Clarification of concepts about soil water stability mechanism]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 78–86. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-78-86

References

- [1] Lamichhane J.R., Debaeke P., Steinberg C., You M.P., Barbetti M.J., Aubertot J.N. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and soil*, 2018, v. 432, pp. 1–28.
- [2] Haydu-Houdeshella C.A., Grahamb R.C., Hendrix P.F., Peterson A.C. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California. *Geoderma*, 2018, v. 320, pp. 201–208.
- [3] Mao J., Nierop K.G.J., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review. *J. of Soils and Sediments*, 2019, v. 19, pp. 171–185.
- [4] Ivanova O.I., Burakov D.A. *Eroziya pochv* [Soil erosion]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvenniy agrarniy universitet, 2020, 103 p.
- [5] Rychkova M. I. *Vodoprochnost' pochvy i urozhajnost' ozimoy pshenicy v zavisimosti ot sposoba osnovnoy obrabotki i predshestvennika na erozionno-opasnom sklone* [Soil water stability and yield of winter wheat depending on the method of main processing and the predecessor on the erosion-hazardous slope]. *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2020, no. 31. Available at: <https://jbsk.ru/archive/issue-31/article-4> (accessed 15.02.2023).
- [6] Vershinin P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, 188 p.
- [7] Nikolayeva E.I. *Ustoychivost' pochvennykh agregatov k vodnym i mekhanicheskim vozdeystviyam* [Resistance of soil aggregates to water and mechanical influences]. Diss. Cand. Sci. (Biol.), MSU. Moscow, 2016, 104 p.
- [8] Ghezelbash E., Hossein Mohammadi M., Shorafa M. Investigation of Soil Mechanical Resistance Threshold Values for Two Wheat Cultivars in a Loamy Sand Soil. *J. of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, pp. 1–12.
- [9] Schjønning P., Lamandéa M., Munkholma L.J., Lyngvig H.S., Nielsen J.Aa. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, v. 163, pp. 298–308.
- [10] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehdorff E., Mikutta R. Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [11] Verchot L.V., Dautaur L., Shepherd K.D., Albrecht A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. *Geoderma*, 2011, v. 161(3–4), pp. 182–193.
- [12] García-González I., Quemada M., Gabriel J.L., Alonso-Ayuso M., Hontoria C. Legacy of eight year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 6, pp. 818–826.
- [13] Lucas M., Schlüter S., Vogel H.J., Vetterlein D. Soil structure formation along an agricultural chronosequence. *Geoderma*, 2019, v. 350, pp. 61–72.
- [14] Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 2018, v. 137, no. 1–2, pp. 27–49.
- [15] Song R., Liu L., ChunSheng W., LiYan M. Effect of soybean root exudates on soil aggregate size and stability. *J. of Northeast Forestry University*, 2009, v. 37, no. 7, pp. 84–86.
- [16] Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebnick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time. *European J. of Soil Science*, 2017, v. 68, no. 6, pp. 806–816.

- [17] 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, v. 110, pp. 24–31.
- [18] Milanovskiy E.Yu. *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* [Humus substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds]. Moscow: GEOS, 2009, 186 p.
- [19] Shein E.V., Milanovskiy E.Yu. *Rol' i znachenie organicheskogo veshchestva v obrazovanii i ustoychivosti pochvennykh agregatov* [The role and significance of organic matter in the formation and stability of soil aggregates]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2003, no. 1, pp. 3–61.
- [20] Fedotov G.N., Dobrovolskiy G.V. *Vozможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях* [Possible ways of nanostructure formation in soil gels]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 8, pp. 908–920.
- [21] Shinkarev A.A., Mel'nikov L.V., Zaynullin T.E. *Priroda vodopronchnosti agregatov gumusovykh gorizontov temno-seroy lesnoy pochvy* [The nature of water resistance of aggregates of humus horizons in dark gray forest soil]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1999, no. 3, pp. 348–353.
- [22] Shinkarev A.A., Perepelkina E.B. *Soderzhanie i sostav gumusovykh veshchestv v vodopronchnykh agregatakh temno-seroy lesnoy pochvy* [The content and composition of humic substances in water-stable aggregates of dark gray forest soil]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1997, no. 2, pp. 165–172.
- [23] Kogut B.M. *Transformatsiya gumusovogo sostoyaniya chernozemov pri ikh sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii* [Transformation of the humus state of chernozems during their agricultural use]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1998, no. 7, pp. 794–802.
- [24] Kogut B.M. *Printsipy i metody otsenki sodержaniya transformiruemogo organicheskogo veshchestva v pakhotnykh pochvakh* [Principles and methods for assessing the content of transformed organic matter in arable soils]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2003, no. 3, pp. 308–316.
- [25] Osipov V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazheniy v gruntakh* [Physico-chemical theory of effective stresses in soils]. *Gruntovedenie* [Ground Science], 2013, no. 2, pp. 3–34.
- [26] Ushkova D.A., Konkina U.A., Gorepekin I.V., Potapov D.I., Shein E.V., Fedotov G.N. *Ustoychivost' agregatov pakhotnykh pochv: eksperimental'noe opredelenie i normativnaya kharakteristik* [Stability of aggregates of arable soils: experimental determination and normative characteristics]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2023, v. 56, no. 2, pp. 203–210.
- [27] Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods for studying the physical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
- [28] Dexter A.R., Horn R., Kemper W. Two mechanisms of age hardening. *J. Soil Sci.*, 1988, v. 39, pp. 163–175.
- [29] Vinogradova O.I. *Osobennosti gidrodinamicheskogo i ravnovesnogo vzaimodeystviya gidrofobnykh poverkhnostey* [Features of hydrodynamic and equilibrium interaction of hydrophobic surfaces]. Diss. Dr. Sci. (Phys.-Math.). Moscow. 2000, 175 p.
- [30] Deryagin B.V., Churaev N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Nauka [Science], 1984, 159 p.

Author's information

Ushkova Dar'ya Aleksandrovna — student of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Researcher at the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University of the Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

Fedotov Gennadiy Nikolaevich — Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@mgul.ac.ru

Received 17.04.2023.

Approved after review 22.03.2024.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest