

УДК 631.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН С. А. Шоба¹, Е. В. Шеин¹, Д. А. Ушкова¹,
Т. А. Грачева¹, О. А. Салимгареева¹, Г. Н. Федотов^{1,*}

Поступило 22.08.2022 г.

После доработки 20.09.2022 г.

Принято к публикации 22.09.2022 г.

Изучено влияние контакта с водой почвенных агрегатов чернозема, дерново-подзолистой и серой лесной почв на их водоустойчивость. Установлено, что увеличение времени контакта почвенных агрегатов с водой приводит к плавному снижению их водоустойчивости. Проведенная проверка влияния растворов солей на водоустойчивость почвенных агрегатов показала, что потеря водоустойчивости агрегатов при контакте с водой не связана прямо пропорционально с расклинивающим давлением. Установлено, что при контакте почвенных агрегатов с водой из них выделяются фрактальные кластеры из частиц гумусовых веществ (Ф-кластеры). Выдвинуто предположение о том, что Ф-кластеры, являющиеся основой почвенных гелей, обуславливают физический базис водоустойчивости почв.

Ключевые слова: агрегаты почв, водоустойчивость, расклинивающее давление, коллоидно-химическая модель почв, фрактальные кластеры из частиц гумусовых веществ (Ф-кластеры)

DOI: 10.31857/S2686739722601764, EDN: PDCBTV

Благоприятное агрегатное состояние почвы – важнейшее условие обеспечения ею плодородия. Благодаря стабильности состояния почвенных агрегатов она проявляет свойство устойчивости к эрозионным и механическим воздействиям, переуплотнению и другим неблагоприятным природным и антропогенным явлениям.

Декстер [1] отмечал, что для сельского хозяйства почва должна иметь не только хорошую, но и стабильную структуру по отношению к двум основным воздействиям: (а) способности почвы сохранить свою структуру под действием воды; и (б) способности влажной почвы сохранять свою структуру под действием внешних механических напряжений. При этом предположение о двух видах воздействий – воды и механических сил на водоустойчивость агрегатов однозначно доказано не было [2].

В большом количестве работ [2, 3] указано, что агрегатный состав и водоустойчивость агрегатов связаны с органическим веществом почв, его количеством и качеством, но до сих пор не имеется удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи. При этом попыток использования представлений о надмолекуляр-

ной структуре гумусовых веществ (ГВ) [4] для объяснения водоустойчивости почвенных агрегатов нами в литературе обнаружено не было.

Целью работы являлась проверка возможности существования отдельного влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов воды и механических воздействий, а также применение для объяснения водоустойчивости почв представлений о надмолекулярной структуре ГВ.

В работе использовали образцы, отобранные из верхних (пахотных) горизонтов дерново-подзолистой почвы (Чашниково, Московская область), серой лесной почвы (Суздаль, Владимирская область) и чернозема типичного (Скопинский район, Рязанская область).

При подготовке образцов почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сита, отбирая агрегаты диаметром 4.5–5 мм.

В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой 2 алюминиевых уголка, закрепленных таким образом, чтобы угол был ориентирован по направлению действия силы тяжести (рис. 1 а, 1). В нижней части уголка были размещены фитили из хлопчатобумажной ткани (рис. 1 а, 2). В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов¹ так, чтобы они касались друг

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

¹ Количество агрегатов, укладываемых в уголки, лимитировалось размерами емкости, в которой проводили их вакуумирование.

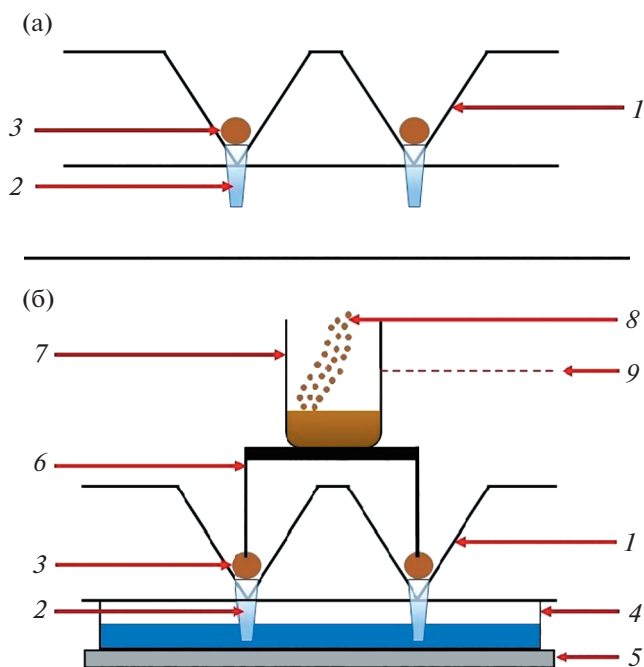


Рис. 1. а – Схема кассеты для определения водоустойчивости почвенных агрегатов. 1 – Аллюминиевые уголки, соединенные между собой; 2 – хлопчатобумажные фитили; 3 – почвенные агрегаты. б – Общая схема установки для определения водоустойчивости почвенных агрегатов: 1 – аллюминиевые уголки, соединенные между собой; 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.

друга. Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении 15 кПа. Условия были подобраны в ходе изучения водоустойчивости воздушно-сухих агрегатов в предварительных экспериментах. После этого агрегаты в вакууме через фитили капиллярно увлажняли до значений, близких к насыщению. Время увлажнения меняли, но оптимальное время для дерново-подзолистых почв составляло 15 мин.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом (рис. 1 б, 4, 5), чтобы фитили агрегатов обеспечивали сохранение насыщения агрегатов водой, достигнутое на этапе вакуумирования. Использовали воду и растворы хлорида калия (0.1 и 1 н). Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия, закрепленные на площадке (рис. 1 б, 6), на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой (рис. 1. б, 7). Использование двух лезвий обеспечивало устой-

чивость устройства при воздействии на агрегаты, а также увеличивало количество агрегатов, которые одновременно рассекали лезвия. Добавляя песок в стаканчик (рис. 1 б, 8), повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов. Луч лазера (рис. 1 б, 9), закрепленный на другом штативе, направленный на мерную шкалу стаканчика, позволял хорошо контролировать процесс разрушения агрегатов.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонах (мН). Для получения удельной характеристики нагрузку делили на общее количество агрегатов в повторности – 28 штук.

Эксперименты проводили в шестикратной повторности с последующей статистической обработкой результатов с использованием программного обеспечения OriginPro, в котором рассчитывали доверительный интервал, который не превышал 10% при 95%-ном уровне значимости.

Электронно-микроскопическое исследование проводили при помощи растрового электронного микроскопа JEOL-6060A лаборатории экологического почвоведения (фирмы “JEOL”, Япония) с вольфрамовым катодом при ускоряющем напряжении 2–5 кВ. Суспензии разбавляли в 10 раз, 5 мкл наносили на атомно-гладкую поверхность слюды и высушивали. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (фирмы “JEOL”, Япония).

Для проверки возможности существования отдельного влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов воды и механических воздействий мы решили использовать метод “лезвий”, меняя время контакта агрегатов с водой перед определением водоустойчивости². Было изучено влияние времени взаимодействия агрегатов почв различных типов с водой на величину их водоустойчивости. Результаты представлены на графике (рис. 1).

Из полученных данных хорошо видно, что при увеличении времени контакта агрегатов всех изученных почв с водой их водоустойчивость экспоненциально снижается, что подтверждает предположение Декстера [1]. Следовательно, вода без механического воздействия оказывает влияние (снижает) водоустойчивость почвенной структуры.

Объяснять подобное снижение водоустойчивости принято влиянием расклинивающего давления [5–7]. Механизм разрушения внутриагрегатных связей обусловлен расклинивающими свойствами водной пленки, заключенной между

² В обычных условиях это время перед определением предельной нагрузки расщепления агрегатов составляет для дерново-подзолистой почвы 15 и 30 мин для чернозема.

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 [7]. Силы притяжения обусловлены межмолекулярным взаимодействием (силами Ван-дер-Ваальса), сорбцией, гидрофобными взаимодействиями. Так, гидрофобные компоненты гумусовых веществ, обращенные в межпластинное пространство частиц глинистых минералов, способствуют соединению частиц и уменьшению расклинивающего давления почвенной влаги, разрушающего почвенные агрегаты в отсутствие гидрофобной поверхности [8, 9].

Источником силы отталкивания является электростатическое взаимодействие диффузных частей двойных электрических слоев соседних частиц. Увеличение концентрации ионов в зазоре между частицами при перекрытии ионных атмосфер создает локальное осмотическое давление, под влиянием которого жидкая фаза стремится войти в прослойку между ними и раздвинуть их. Так возникает электростатическая компонента расклинивающего давления [7].

Данные теоретические обоснования потери водоустойчивости почвенных агрегатов при их контакте с водой, перенесенные с грунтов на почвы, нуждались в экспериментальной проверке. Для этого на черноземе, серой лесной и дерново-подзолистой почвах было проведено определение водоустойчивости в 0.1 и 1 н растворах хлорида калия.

При существовании значимого влияния расклинивающего давления водоустойчивость образцов при таком определении должна была превышать водоустойчивость, измеренную в воде. Однако различий водоустойчивостей мы не обнаружили (табл. 1). Это свидетельствовало о том, что, несмотря на привычность представлений о значимом влиянии расклинивающего давления на водоустойчивость, это не соответствует действительности.

Для объяснения полученных результатов еще раз перечислим факты: расклинивающее давление в почвах существует и оказывает влияние на почвы и многие их свойства, но оно не оказывает влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов.

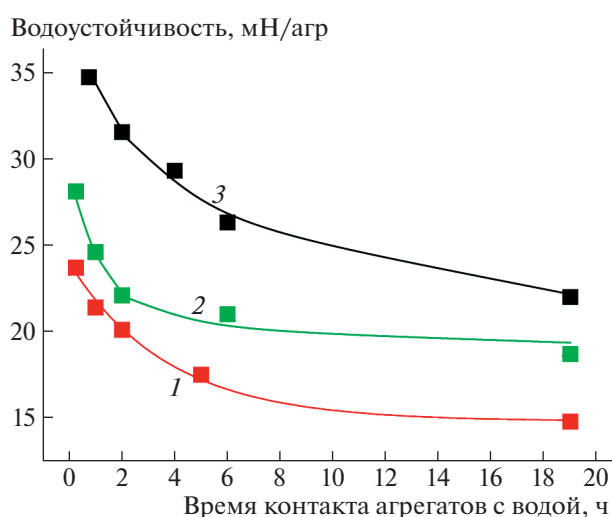


Рис. 2. Изменение водоустойчивости почвенных агрегатов при увеличении времени контакта агрегатов с водой перед определением водоустойчивости. 1 – дерново-подзолистая почва; 2 – серая лесная почва; 3 – чернозем.

Модельные представления о водоустойчивости базируются на том, что в его основе лежат гидрофобные взаимодействия между гидрофобными участками амфифильных молекул гумусовых веществ [4, 9] с мозаичной поверхностью. Гидрофильные и гидрофобные участки на поверхности частиц ГВ чередуются, но описанное выше увеличение размера ионных атмосфер около гидрофильных участков не влияет на взаимодействие частиц ГВ через гидрофобные участки.

Так как пространственно гидрофильные и гидрофобные участки в молекулах гумусовых веществ не разъединены, то объяснить отсутствие влияния увеличения размера ионных атмосфер на водоустойчивость можно только дальнедействием гидрофобных сил [10]. Расчеты Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева [5] показывают, что для частиц размером 100 нм действие расклинивающего давления простирается на 15–20 нм, а в работе О.И. Виноградовой [10] приводятся данные о распространении действия гидрофобных сил до 100 нм.

Это объяснение хорошо разрешает возникшее противоречие между наличием в почвах раскли-

Таблица 1. Определение водоустойчивости почвенных агрегатов методом “лезвий” в воде и 0.1 и 1 н водных растворах хлорида калия, мН/агр

Почва	Вода	0.1 н раствор хлорида калия	1 н раствор хлорида калия
Дерново-подзолистая почва (залежь)	23.75 ± 0.86	23.71 ± 1.32	23.87 ± 1.55
Серая лесная почва (после пшеницы)	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

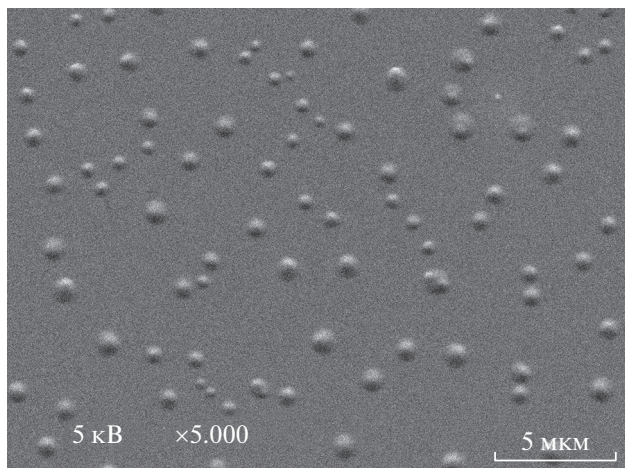


Рис. 3. Φ -кластеры, перешедшие в воду при контакте агрегатов чернозема с водой через хлопчатобумажную ткань в течение 19 ч.

нивающего давления и отсутствием его влияния на водоустойчивость почвенных агрегатов, но оно не отвечает на вопрос о механизме снижения водоустойчивости агрегатов при их контакте с водой.

Для того чтобы объяснить механизм снижения водоустойчивости, мы решили использовать представления о надмолекулярной организации ГВ. Методом малоуглового рассеяния показано [11–13], что частицы ГВ в растворах образуют фрактальные кластеры (Φ -кластеры) размером 100–200 нм. Этим же методом экспериментально установлена фрактальная организация почв различных типов и при помощи туннельной микроскопии показано, что Φ -кластеры из гумусовых веществ являются структурными элементами, лежащими в основе почвенных гелей [4]. Эти гели связывают почвенные частицы в агрегате между собой. Отмечено [4], что при помещении чистых поверхностей в почву на них начинают переходить Φ -кластеры, которые, по-видимому, обладают достаточной подвижностью. Поэтому снижение водоустойчивости агрегатов при их контакте с водой может происходить, если Φ -кластеры способны при контакте с водой почвенных агрегатов переходить в нее, снижая количество связей внутри агрегатов.

Для проверки этого предположения почвенные агрегаты привели в контакт с водой через хлопчатобумажную ткань и выдерживали в течение 19 ч. Затем воду, которая могла содержать Φ -кластеры, разбавили, нанесли на поверхность слюды, высушили и изучили полученные образцы при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На микрофотографии, представленной в качестве примера (рис. 3), хорошо видны Φ -кластеры,

выделившиеся из чернозема. Аналогичные микрофотографии получены для Φ -кластеров, выделившихся из дерново-подзолистой и серой лесной почв.

Из полученных данных следует, что Φ -кластеры, составляющие почвенные гели, способны переходить в контактирующую с ними воду, а водоустойчивость почвенных агрегатов в определенной степени обусловлена Φ -кластерами, являющимися основой почвенных гелей. Сопоставляя эту информацию со сведениями из литературных источников по лабильному (растворимому в воде) гумусу [14, 15], можно предположить, что лабильный гумус, обеспечивающий водоустойчивость почв, может представлять собой Φ -кластеры.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ №122011800459-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dexter A.R.* Advances in characterisation of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 2: 199–239. Dexter A.R., Horn R. and Kemper W. Two mechanisms of age hardening // *J. Soil Sci.* 1988. V. 39. P. 163–175.
2. *Николаева Е.И.* Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям. Дисс. канд. биол. наук. М.: 2016. 104 с.
3. *Verchot L.V., Dutaour 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. 161 (3–4). P. 182–193.
4. *Федотов Г.Н., Добровольский Г.В.* Возможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях // *Почвоведение*. 2012. № 8. С. 908–920.
5. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.
6. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Горобец А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А., Судницын И.И.* Экспериментальное исследование факторов, влияющих на эродруемость почв // *Почвоведение*. 2018. № 3. С. 347–356.
7. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // *Грунтоведение*. 2013. № 2. С. 3–34.
8. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС. 2009. 186 с.
9. *Шеин Е. В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // *Почвоведение*. 2003. № 1. С. 53–61.
10. *Виноградова О.И.* Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей. Дисс. докт. физ.-мат. Наук. М.: 2000. 175 с.

11. *Osterberg R., Mortensen K.* Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics J.* 1992. V. 21 (3). P. 163–167.
12. *Senesi N., Rizzi F.R., Dellino P., Acquafredda P.* Fractal humic acids in aqueous suspensions at various concentrations, ionic strengths, and pH values. *Colloids and Surfaces A. // Physicochemical and Engineering Aspects.* 1997. V. 127. Iss. 1–3. P. 57–68.
13. *Senesi N., Rizzi F.R., Dellino P., Acquafredda P.* Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH and time // *Soil Science Society of Am. J.* 1996. V. 60. № 6. P. 1613–1678.
14. *Козут Б.М.* Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // *Почвоведение*, 2003. № 3. С. 308–316.
15. *Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б.* Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы // *Почвоведение*, 1997. № 2. С. 165–172.

PHYSICO-CHEMICAL ASPECTS OF SOIL WATER STABILITY

Corresponding Member of the RAS **S. A. Shoba^a, E. V. Shein^a, D. A. Ushkova^a,
T. A. Gracheva^a, O. A. Salimgareeva^a, and G. N. Fedotov^{a,#}**

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

The influence of contact with water of soil aggregates of chernozem, sod-podzolic and gray forest soils on their water stability has been studied. It is established that an increase in the contact time of soil aggregates with water leads to a gradual decrease in their water stability. The conducted verification of the effect of salt solutions on the water stability of soil aggregates showed that the loss of water stability of aggregates in contact with water is not directly proportional to the disjoining pressure. It was found that when soil aggregates come into contact with water, fractal clusters of humus particles (F-clusters) are isolated from them. It is suggested that F-clusters, which are the basis of soil gels, determine the physical basis of soil waterproofness.

Keywords: soil aggregates, water stability, disjoining pressure, colloidal chemical model of soils, fractal clusters of humus particles (F-clusters)