

УДК 631.43

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-52-58

ВЫБОР УСЛОВИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИАГРЕГАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА ВОДОПРОЧНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Д.И. Потапов¹, И.В. Горепекин¹, Г.Н. Федотов¹,
В.С. Шалаев², Ю.П. Батырев²

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

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

lesfak@bk.ru

Приведены результаты поиска подходов к оценке водоустойчивости почвенных агрегатов с помощью модифицированного метода Андрианова. Показано, что распад агрегатов в стоячей воде описывается кинетическим уравнением реакции первого порядка, при этом методы формальной кинетики для описания распада почвенных агрегатов применимы ограниченно ввиду значительного изменения константы скорости реакции во времени. В частности, удобно использовать усредненную константу скорости реакции при сравнении водоустойчивости разных образцов агрегатов. Выявлены основные факторы, влияющие на скорость распада агрегатов: заземленный воздух, производимые анаэробными микроорганизмами газы, внутриагрегатные связи, скорость поступления воды в агрегаты. В ходе проведенных экспериментов показано, что оценку водоустойчивости следует проводить на влажных агрегатах при нормальном атмосферном давлении. Это позволит нивелировать влияние заземленных газов микробного происхождения и обеспечит доминирование влияния внутриагрегатных связей, которые поддерживают водоустойчивость во влажных агрегатах реальных почв.

Ключевые слова: водоустойчивость почвенной структуры, внутриагрегатные связи, заземленный воздух, заземленные газы анаэробных микроорганизмов, выбор условий для оценки водоустойчивости почв

Ссылка для цитирования: Потапов Д.И., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Выбор условий для изучения влияния внутриагрегатных связей на водопрочность почвенных агрегатов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 4. С. 52–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-52-58

Структура почв представляет собой одну из важнейших агрономических характеристик, определяющих их сельскохозяйственную ценность [1]. От нее зависит объем и качество порового пространства, которые формируют водно-воздушные условия для развития растений. Дефицит воды так же, как и нехватка воздуха являются основными факторами, лимитирующими прорастание семян и развитие растений. В связи с этим способность почв сохранять структуру под действием текучих вод и обеспечивать растения достаточным для их развития количеством кислорода в значительной мере определяет возможность получения высоких урожаев.

При этом под структурой почвы большинство исследователей [1–3] понимают отдельно (агрегаты), на которые способна распадаться почва и которые сами состоят из соединенных между собой механических элементов. Эти авторы не делают разграничений между понятиями «структура», «агрегат», «структурная отдельность» почвы [4]. Способность почв сохранять свою уникальную структуру (хорошо различимые почвенные агрегаты) после обильных осадков и последующего легкого подсушивания определяется ее водоустойчивостью [4].

В настоящее время предполагают, что водоустойчивость почвенной структуры обусловлена амфифильностью почвенной органики [5, 6], которая своими полярными участками связывается

с глинистыми минералами, а гидрофобные части молекул гумуса обеспечивают образование водопрочных связей. При этом считают [6], что влияние на амфифильность почвенной органики оказывают микроорганизмы, развивающиеся в аэробных и анаэробных зонах почвенных агрегатов [7–9]. Необходимо также отметить, что представления о структурной организации почвенной органики, которая определяет водоустойчивость почвенных агрегатов, непрерывно совершенствуются: от отдельных частиц (макромолекул) [10] до образований из этих частиц без уточнения их структурной организации [11, 12] и далее до фрактальных структур [13–15]. Вся эта новая информация заставляет совершенствовать подходы при рассмотрении взаимодействия гумусовых веществ в почве.

Важным вопросом при проверке предположения об обеспечении водоустойчивости почв за счет гидрофобных связей между частицами гумусовых веществ (ГВ) является выбор метода исследования. Известны различные подходы к определению водопрочности почвенной структуры [16]. В связи с тем, что водопрочность характеризует изменение почвенной структуры при воздействии на нее во времени воды, желательно использовать кинетические методы.

С этой точки зрения одним из лучших является метод Андрианова [16], который позволяет получать кинетические кривые распада почвенных

агрегатов в стоячей воде. Основной его недостаток — неизученность влияния на процесс распада почвенных агрегатов наличия в них заземленно-го воздуха.

Цель работы

Цель работы — совершенствование метода Андрианова и выбор условий, при которых следует проводить оценку влияния пробоподготовки почвенных образцов на их водоустойчивость.

Материалы и методы

Исследования проводили на образцах агро-дерново-глубокоподзолистой легкосуглинистой почвы на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях, подстилаемых с глубины 92 см бескарбонатными лессовидными (покровными) суглинками, с помощью модифицированного метода Андрианова. Была изготовлена кассета со 106 ячейками диаметром 7 мм. Проволока диаметром 2 мм делила каждую ячейку на две части. В ячейки помещались агрегаты размером 4,5...5,0 мм. После этого кассету с агрегатами опускали в сосуд с водой, чтобы над агрегатами был слой воды 1...2 см. Сосуд ставили на вибростенд и для ускорения распада агрегатов включали вибрацию (частота 50 Гц). Каждые 5 мин проводили фотографирование кассеты с агрегатами. Измерения проводили в течение 65 мин. Длительность проведения эксперимента связана с достижением максимальных значений распада агрегатов при изученных амплитудах вибрации. Распавшиеся агрегаты проваливались, освобождая ячейки, что было хорошо видно на фотоснимках.

Подсчитывая количество оставшихся в кассете агрегатов от времени их взаимодействия с водой, получали кинетические кривые распада почвенных агрегатов, ход которых зависел от амплитуды колебаний вибростенда (рис. 1). Полученные кинетические кривые хорошо аппроксимировались экспоненциальными уравнениями первого порядка. Коэффициент корреляции — 0,94–0,99.

Для установления порядка реакции строили график в координатах «скорость распада агрегатов — количество агрегатов», рассчитывая скорость распада как отношение количества распавшихся агрегатов ($N_1 - N_2$) в течение 10 минут. Линейность полученной зависимости (рис. 2) свидетельствовала о первом порядке реакции распада агрегатов в стоячей воде, которая следовала из физического смысла этой реакции.

На следующем этапе, используя уравнение реакции первого порядка, вычисляли константу скорости реакции:

$$v = k \times N \rightarrow \frac{N_1 - N_2}{\tau_1 - \tau_2} = k \times \frac{N_1 + N_2}{2},$$

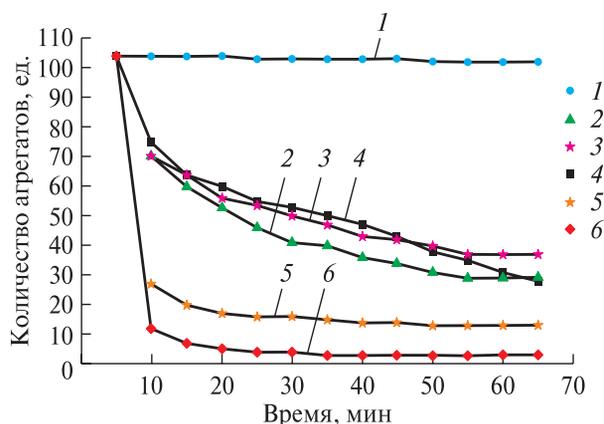


Рис. 1. Влияние амплитуды вибрации на водоустойчивость агрегатов дерново-подзолистой почвы при следующих режимах: 1 — нет вибрации; 2 — вибрация 0,3 мм; 3 — 0,45 мм; 4 — 0,6 мм; 5 — 0,75 мм; 6 — 0,9 мм

Fig. 1. Influence of vibration amplitude on water stability of sod-podzolic soil aggregates under the following modes: 1 — no vibration; 2 — vibration 0,3 mm; 3 — 0,45 mm; 4 — 0,6 mm; 5 — 0,75 mm; 6 — 0,9 mm

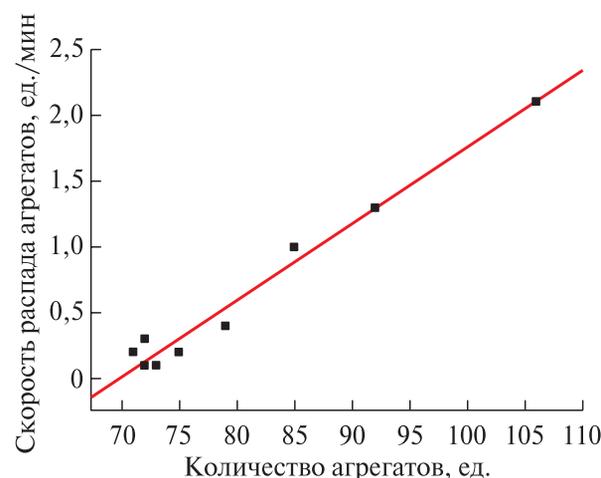


Рис. 2. Проверка первого порядка реакции распада агрегатов дерново-подзолистой почвы графическим методом

Fig. 2. Checking the first order reaction of sod-podzolic soil aggregates decomposition by a graphical method

где v — скорость распада агрегатов;

N_1 и N_2 — соответственно начальное и конечное количество агрегатов в промежутке времени;

τ_1 и τ_2 — соответственно начальный и конечный промежуток времени;

k — константа скорости.

Отсюда получаем:

$$k = \frac{(N_1 - N_2) \times 2}{(\tau_1 - \tau_2)(N_1 + N_2)}.$$

По результатам вычислений построили зависимость в координатах константы скорости от времени измерения (рис. 3).

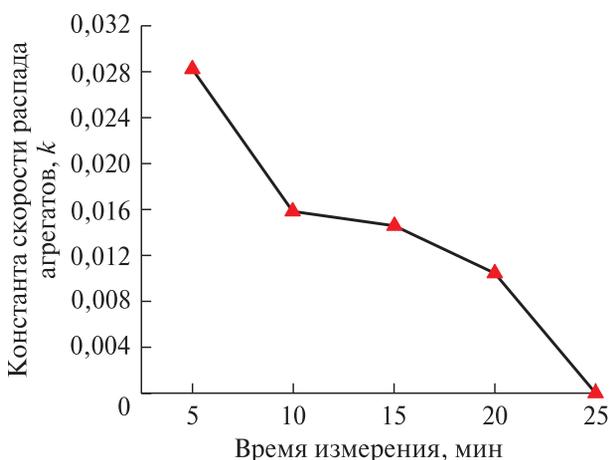


Рис. 3. Зависимость константы скорости распада агрегатов дерново-подзолистой почвы от времени

Fig. 3. Dependence on time of the rate constant of sod-podzolic soil aggregates decomposition

В отличие от химических реакций, где константа скорости является постоянной величиной на протяжении всего периода протекания реакции, в процессе распада почвенных агрегатов константа скорости уменьшается во времени при снижении количества оставшихся агрегатов. Это свидетельствует о том, что у нераспавшихся агрегатов прочность и количество контактов в агрегатах тем больше, чем дольше они не распадаются.

В этих условиях использование методов формальной кинетики некорректно. На наш взгляд, допустимо и удобно применять интегральный показатель усредненной константы скорости реакции, что позволяет проводить сравнение скоростей распада агрегатов при различных амплитудах вибрации, а также при разных степенях увлажнения почвенных агрегатов. Расчет проводили по формуле

$$k = \frac{\ln\left(\frac{A}{A-x}\right)}{\tau}$$

где A — общее количество агрегатов;

x — количество распавшихся агрегатов за промежуток времени t ;

τ — время проведения эксперимента (65 мин).

Общепринято полагать [3, 4], что разрушение почвенных агрегатов в воде определяется защемленным в них воздухом. В результате удаления воздуха водопрочность агрегатов возрастает на несколько порядков. Для этого используют вакуумирование перед помещением агрегатов в воду или капиллярное увлажнение в течение нескольких суток [3, 4]. В целях учета влияния этого важнейшего фактора в модифицированный метод Андрианова включили следующие дополнительные процедуры:

– определение суммарной массы агрегатов, помещаемых в кассету;

– вакуумирование агрегатов, находящихся в кассете, в течение 15 мин при давлении 15 кПа;

– перемещение кассеты таким образом, чтобы фитили, спускающиеся с проволочек, разделяющих ячейки кассеты пополам, начинали контактировать с водой, обеспечивая капиллярное увлажнение агрегатов в вакууме в течение следующих 15 мин;

– отключение вакуума, поднятие уровня воды на 1...2 см выше агрегатов и включение вибростенда;

– проведение фотографирования агрегатов в кассете каждые 5 мин в течение 65 мин;

– расчет усредненной константы скорости реакции распада агрегатов в воде по количеству оставшихся агрегатов через 65 мин вибровоздействия;

– построение зависимости навески агрегатов в кассете от усредненной константы скорости реакции распада агрегатов.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования изучали распад воздушносухих и влажных почвенных агрегатов по модернизированной методике Андрианова при поступлении в них воды в условиях вакуума. Установлено, что водостойчивость воздушносухих агрегатов в условиях вакуума сильно возрастает в отличие от условий нормального атмосферного давления (рис. 4).

При оценке водостойчивости следует учитывать влияние размера почвенных агрегатов, что отражается в зависимости водостойчивости агрегатов от их суммарной массы, поскольку агрегаты, находящиеся в воде и колеблющиеся при воздействии на них вибрации, распадаются постепенно — от них откалываются небольшие части, которые проваливаются через ячейки кассеты. У больших агрегатов время уменьшения размера до момента выпадения остатков агрегатов из ячеек кассеты больше, чем у агрегатов меньшего размера, поэтому фиксация их распада по используемой методике занимает больше времени. Поэтому для корректного сравнения получаемых данных необходимо учитывать размер агрегатов, который пропорционален их суммарной навеске.

Был проведен эксперимент, в котором капиллярное увлажнение воздушносухих агрегатов проводили не только 15 мин в вакууме, как описано выше, а дополнительно еще в течение суток. Однако их водостойчивость при изменении условий эксперимента не увеличилась, что подтвердило лимитирующее влияние именно защемленного воздуха на повышение водостойчивости агрегатов, которые подвергали длительному предварительному капиллярному увлажнению [4].

Изучение водоустойчивости влажных агрегатов в условиях вакуума показало, что влажные агрегаты при этом распадаются заметно быстрее воздушносухих агрегатов (рис. 4).

На основе имеющихся к настоящему времени данных и полученных результатов проанализируем механизм процесса распада агрегатов в стоячей воде по модифицированному методу Андрианова и определим лимитирующие его факторы.

В случае проведения экспериментов при атмосферном давлении основное влияние на процесс распада оказывает защемленный воздух. При помещении сухих агрегатов в воду процесс поступления в них воды происходит очень быстро, что приводит к скачку давления защемленного воздуха и распаду (микровзрыву) агрегатов [1, 3].

Таким образом, изучать водоустойчивость воздушносухих агрегатов в условиях нормального атмосферного давления не имеет смысла, поскольку основное влияние на водоустойчивость в этих условиях оказывает защемленный воздух.

При определении водоустойчивости воздушносухих агрегатов, по методу Андрианова, в условиях вакуума воздух из их капилляров удаляется полностью. В анаэробной части агрегатов газы не образуются вследствие практически полной остановки микробиологических процессов в воздушносухой почве, что приводит к устранению влияния защемленного воздуха и газов на процесс распада агрегатов в стоячей воде. В связи с этим можно проводить оценку водопрочности воздушносухих агрегатов в вакууме и сравнивать их между собой. Однако нет полного понимания, определяют ли их водоустойчивость те же связи, что и во влажных агрегатах реальных почв [17].

В то же время, из влажных агрегатов защемленный воздух, по-видимому, удаляется полностью, но защемленные в анаэробных зонах газы [7–9] остаются и определяют устойчивость агрегатов. В результате в условиях вакуума наблюдается обратная картина: влажные агрегаты имеют меньшую водоустойчивость по сравнению с воздушносухими агрегатами (рис. 4). Можно ожидать, что при росте биологической активности почв определяемая этим методом водоустойчивость агрегатов вследствие роста содержания в них защемленных газов будет снижаться.

Следовательно, определение водоустойчивости влажных почвенных агрегатов в вакууме теряет смысл, поскольку определяющим фактором их водоустойчивости становится напряженность биохимических процессов, которые приводят к образованию нерастворимых в воде газов, а не прочность связей внутри агрегатов.

Устранить доминирующее влияние этого фактора на распад агрегатов может, во-первых, снижение влияния защемленных газов, которое

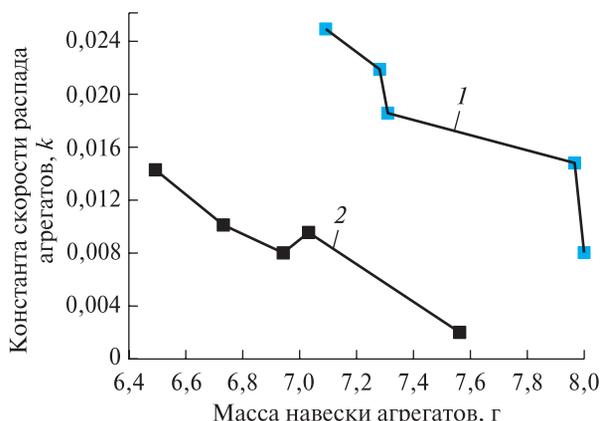


Рис. 4. Усредненные константы скорости распада агрегатов дерново-подзолистой почвы различной степени увлажнения в зависимости от массы навески агрегатов: 1 — влажные агрегаты; 2 — воздушно-сухие агрегаты

Fig. 4. Average rate constants of sod-podzolic soil aggregates decomposition of various degrees of moisture depending on the weight of the sample aggregates: 1 — wet units; 2 — air-dry units

существенно меньше в условиях нормального атмосферного давления, во-вторых, наличие в агрегатах защемленного воздуха, количество которого будет больше количества газов, накопившихся в агрегате в результате жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов.

В таком случае при определении водоустойчивости образцов влажных агрегатов при атмосферном давлении при их одинаковой (близкой) влажности распад агрегатов должен определяться, в первую очередь, скоростью поступления в агрегаты воды и прочностью связей между частями агрегатов. Как следствие, быстрее должны распадаться агрегаты с более гидрофильной поверхностью капилляров, прочность которых обеспечивается меньшим количеством гидрофобных связей.

Выводы

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных данных удалось выбрать условия проведения опытов по методу Андрианова, позволяющих изучать с его помощью влияние способов пробоподготовки почвенных образцов на их водоустойчивость. Исследования должны проводиться на агрегатах с одинаковой (близкой) влажностью при атмосферном давлении, что позволит оценить структурообразующую роль гидрофобных связей почвенных агрегатов, а также устранить влияние защемленных в анаэробных зонах газов.

Список литературы

- [1] Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования. М.; Л.: Изд-во АН СССР, Ленинградское отделение, 1958. 188 с.

- [2] Почвоведение / под ред. И.С. Кауричева. М., Колос. 1975. 496 с.
- [3] Ревут Н.Б. Физика почв. Л.: Колос, 1972, 368 с.
- [4] Хан К.Ю. Энергетическая характеристика водоустойчивости почвенных агрегатов: дис. ... д-ра биол. наук. Пушкино, 2012. 300 с.
- [5] 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.
- [6] Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение, 2003, № 1. С. 53–61.
- [7] Степанов А.Л., Манучарова Н.А. Образование и поглощение парниковых газов в почвенных агрегатах. М.: Университет и школа, 2006. 81 с.
- [8] Hattori T. Soil aggregates as microhabitats for microorganisms // Reports of the Institute for Agricultural Research — Tohoku University (Japan), 1988, v. 37, pp. 23–26.
- [9] Klein A.D., Thayer J.S. Interaction between soil microbial communities and organometallic compounds. Soil Biochem. V. 6. / Eds J.M. Bollag, C Stotsky. N.Y.: Marcel Dekker, 1980, pp. 431–481.
- [10] Александрова Л.Н. Гумус как система полимерных соединений // Тр. юбилейной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения В.В. Докучаева. М.: Изд-во АН СССР, 1949. с. 225–232.
- [11] Liu C, Huang P.M. Atomic Force Microscopy of pH, Ionic Strength and Cadmium Effects on Surface Features of Humic Acid // Understanding Humic Substances: Advanced Methods, Properties and Applications / Eds E. A. Ghabbour, G. Davies. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999, p. 286.
- [12] Ziechmann W. Evolution of Structural Models from Consideration of Physical and Chemical Properties // Humic Substances and Their Role in the Environment / Eds. R.F. Christman. John Wiley & Sons Limited, 1988, pp. 113–132.
- [13] Österberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // European Biophysics J., 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [14] 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, pp. 57–68.
- [15] 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 America J., 1996, v. 60, no. 6, pp. 1613–1678.
- [16] Теории и методы физики почв / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского, Т.А. Архангельской. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
- [17] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И., Пузанова А.Е. Структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв // Почвоведение, 2014. № 9. С. 1056–1067.
- [18] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии. Орел: Изд-во Орловского ГАУ, 2017. 166 с.
- [19] Берестецкий О.А. Фитотоксины почвенных микроорганизмов и их экологическая роль // Фитотоксические свойства почвенных микроорганизмов / под ред. О.А. Берестецкого. Л., ВНИИСХМ. 1978. С. 7–30.
- [20] Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М.: Геос, 2006. 400 с.

Сведения об авторах

Потапов Дмитрий Иванович — аспирант Факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, zmiyovka1995@mail.ru

Горепекин Иван Владимирович — аспирант Факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, decembrist96@yandex.ru

Федотов Геннадий Николаевич — д-р биол. наук, вед. науч. сотр., Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, gennadiy.fedotov@gmail.com

Шалаев Валентин Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shalaev@mgul.ac.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 02.02.2021.

Принята к публикации 01.03.2021.

SELECTION OF CONDITIONS FOR STUDYING INTRAAGGREGATE CONNECTIONS INFLUENCE ON WATER STABILITY OF SOIL AGGREGATES

D.I. Potapov¹, I.V. Gorepyokin¹, G.N. Fedotov¹, V.S. Shalaev², 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 search for approaches to assessment the water resistance of soil aggregates is conducted using the modified Andrianov method. It is shown that the kinetic equation of the first-order reaction could be applied to describe the aggregates destruction in standing water. Methods of formal kinetics at the same time are just partially applicable for the description of soil aggregates destruction because of a significant change in the reaction rate constant over time. In particular, the average constant of reaction rate is convenient for water resistance comparison of different aggregates samples. It is established that the main factors that determine the speed of aggregate destruction are trapped air, gases produced by anaerobic microorganisms as well as intra-aggregate connections and the velocity of water entering the aggregates. In the course of the conducted experiments, it is shown that water resistance assessment should perform on wet aggregates under the normal atmospheric pressure. It allows neutralizing the influence of trapped gases of microbial origin and providing the domination of intra-aggregate connections that sustain water resistance in wet aggregates of real soils.

Keywords: water resistance of the soil structure, intra-aggregate connections, trapped air, trapped gases produced by anaerobic microorganisms, selection of conditions for assessing the water resistance of soils

Suggested citation: Potapov D.I., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. *Выбор условий для изучения влияния внутриагрегатных связей на водостойкость почвенных агрегатов* [Selection of conditions for studying intraaggregate connections influence on water stability of soil aggregates] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 52–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-52-58

References

- [1] Vershinin P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow, Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences. Leningrad branch, 1958, 188 p.
- [2] *Pochvovedenie* [Soil science]. Ed. I.S. Kaurichev. Moscow: Kolos, 1975, 496 p.
- [3] Revut N.B. *Fizika pochv* [Soil physics]. Leningrad: Kolos, 1972, 368 p.
- [4] Khan K.Yu. *Energeticheskaya kharakteristika vodoustoychivosti pochvennykh agregatov* [Energy characteristic of water resistance of soil aggregates]. Dis. Dr. Sci. (Biol.). Pushchino, 2012, 300 p.
- [5] Milanovskiy E.Yu., Shein E.V. *Funktsional'naya rol' amfifil'nykh komponentov gumusovykh veshchestv v protsessakh gumuso-strukturoobrazovaniya i v genezise pochv* [The functional role of amphiphilic components of humic substances in the processes of humus-structure formation and in the genesis of soils]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2002, no. 10, pp. 1201–1213.
- [6] Shein E.V., Milanovskiy E.Yu. *Rol' i znachenie organicheskogo veshchestva v obrazovanii i ustoychivosti pochvennykh agregatov* [The role and importance of organic matter in the formation and stability of soil aggregates]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2003, no. 1, pp. 53–61.
- [7] Stepanov A.L., Manucharova N.A. *Obrazovanie i pogloshchenie parnikovyykh gazov v pochvennykh agregatakh* [Formation and uptake of greenhouse gases in soil aggregates]. Moscow: Universitet i shkola, 2006, 81 p.
- [8] Hattori T. Soil aggregates as microhabitats for microorganisms. Reports of the Institute for Agricultural Research — Tohoku University (Japan), 1988, v. 37, pp. 23–26.
- [9] Klein A.D., Thayer J.S. Interaction between soil microbial communities and organometallic compounds. *Soil Biochem.* Eds J.M. Bollag, C. Stotsky. V. 6. N.Y.: Marcel Dekker, 1980, pp. 431–481.
- [10] Aleksandrova L.N. *Gumus kak sistema polimernykh soedineniy* [Humus as a system of polymer compounds]. Trudy yubil. sessii, posv. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.V. Dokuchaeva [Proceedings of the jubilee. session dedicated. To the 100th anniversary of the birth of V.V. Dokuchaev]. Moscow: Ed. Academy of Sciences of the USSR, 1949, pp. 225–232.
- [11] Liu C, Huang P.M. Atomic Force Microscopy of pH, Ionic Strength and Cadmium Effects on Surface Features of Humic Acid. *Understanding Humic Substances: Advanced Methods, Properties and Applications.* Eds E. A. Ghabbour, G. Davies. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999, p. 286.
- [12] Ziechmann W. Evolution of Structural Models from Consideration of Physical and Chemical Properties. *Humic Substances and Their Role in the Environment.* Eds. R.F. Christman. Wiley & Sons Limited, 1988, pp. 113–132.
- [13] Österberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study. *European Biophysics J.*, 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [14] 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, pp. 57–68.
- [15] 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 America J.*, 1996, v. 60, no. 6, pp. 1613–1678.
- [16] *Teorii i metody fiziki pochv* [Theories and methods of soil physics]. Ed. E.V. Shein, L.O. Karpachevsky, T.A. Arkhangel'skaya. Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.
- [17] Fedotov G.N., Shoba S.A., Pozdnyakov A.I., Puzanova A.E. *Strukturnyy perekhod v gumusovoy matritse pochvennykh geley i ego vliyaniye na svoystva pochv.* *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2014, no. 9, pp. 1056–1067.

- [18] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii* [Use of the soil-biological factor in agriculture]. Oryol: Oryol State Agrarian University, 2017, 166 p.
- [19] Berestetskiy O.A. *Fitotoksiny pochvennykh mikroorganizmov i ikh ekologicheskaya rol'* [Phytotoxins of soil microorganisms and their ecological role]. *Fitotoksicheskie svoystva pochvennykh mikroorganizmov* [Phytotoxic properties of soil microorganisms]. Leningrad: VNIISHM, 1978, pp. 7–30.
- [20] *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of chemical analysis of soils]. Ed. L.A. Vorob'eva. Moscow: Geos, 2006, 400 p.

Authors' information

Potapov Dmitriy Ivanovich — Ph.D. student of the Lomonosov Moscow State University, zmiyovka1995@mail.ru

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Ph.D. student of the Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

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

Shalaev Valentin Sergeevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher of the BMSTU (Mytishchi branch), shalaev@mgul.ac.ru

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

Received 02.02.2021.

Accepted for publication 01.03.2021.