

УДК 631.4

## УСТОЙЧИВОСТЬ АГРЕГАТОВ ПАХОТНЫХ ПОЧВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И НОРМАТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА<sup>1</sup>

© 2023 г. Д. А. Ушкова<sup>а</sup>, У. А. Конкина<sup>а</sup>, И. В. Горепекин<sup>а</sup>, Д. И. Потапов<sup>а</sup>,  
Е. В. Шеин<sup>а</sup>, Г. Н. Федотов<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 12.09.2022 г.

Принята к публикации 13.09.2022 г.

Устойчивость почв в современной физике почв распадается на два направления: водоустойчивость и устойчивость к механическим воздействиям: сдавливание, расклинивание. Оба свойства в насыщенной водой почве основаны на разрыве внутриагрегатных межчастичных связей. Однако нормативных физически обоснованных величин для характеристики устойчивости агрегатов не предложено. Цель статьи – обосновать физическое понятие “устойчивости почвенных агрегатов” и предложить единый методический прием количественной оценки устойчивости как нормативной почвенной характеристики. Разработан высокопроизводительный метод, основанный на рассечении линейно расположенных, насыщенных водой агрегатов при помощи лезвий, находящихся под контролируемой нагрузкой. Основными этапами методики являются вакуумирование агрегатов для устранения неконтролируемого влияния заземленного воздуха, насыщение агрегатов в вакууме водой и последующее определение устойчивости агрегатов к проникновению лезвий. Экспериментальные значения устойчивости получены для 17 почв. Это позволило сформировать нормативные диапазоны для горизонта А пахотных суглинистых почв: дерново-подзолистых – 17–19, серых лесных – 27–29, черноземов – 34–37 мН/агр и др. и позволяет применять получаемую величину как почвенную характеристику устойчивости агрегатов. Обсуждается возможность использования величин устойчивости как методической основы мониторинга устойчивости и деградации почв, количественных направлений оценки состояния физических характеристик почвенных агрегатов, прежде всего, их основного параметра – устойчивости. Учитывая высоко корреляционную зависимость предлагаемой характеристики устойчивости от величин водоустойчивости, полученных методом Саввинова (>85%), и высокую производительность метода определения устойчивости (предлагаемый метод примерно в 20 раз производительнее метода Саввинова) обсуждается возможность его использования и получаемых величин устойчивости агрегатов как общезначимой характеристики, так и отдельной величины для количественной оценки водоустойчивости.

**Ключевые слова:** почвенный агрегат, водоустойчивость, сопротивление расклиниванию

**DOI:** 10.31857/S0032180X22600834, **EDN:** BJXOGS

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых требований при возделывании сельскохозяйственных растений является структурное состояние почв. Наличие агрономически ценной структуры придает почве ряд ценных производственных свойств: рыхлость, облегчающую прорастание семян и развитие растений, благоприятный для растений водно-воздушный и тепловой режимы, противозерозионная устойчивость. Выполнение почвой этих функций возможно только, если ее агрегаты способны проти-

востоять разрушающему действию воды и агротехнологическим механическим воздействиям, то есть обладать водоустойчивостью [4] и устойчивостью к механическим воздействиям [6, 19, 25]. Следует отметить, что и водоустойчивость, и механическая устойчивость определяются количеством и прочностью межчастичных связей, обеспечивающих в определенном диапазоне влажности существование почвенных агрегатов в нераздельном, едином состоянии. По-видимому, оба случая устойчивости почвенных агрегатов определяются, прежде всего, существованием некоторых почвенных “клеев” – веществ органической природы, позволяющих сохранять устойчивость аг-

<sup>1</sup> Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600834>.

регатов при водных и механических воздействиях. Действительно, существуют различные гипотезы о природе почвенных клеев [2, 13], в которых главную роль отводят гумусовым веществам (ГВ) [23, 28], содержанию гумуса, с которым для содержания водоустойчивых агрегатов обнаружена линейная корреляционная связь [10, 22], а также со структурообразующими катионами (Ca, Al, Fe) [24, 26]. Однако механизмы возникновения и природа водоустойчивых связей окончательно не установлены. Из литературных данных следует [27], что водоустойчивость почв связана с их гидрофобностью, то есть количеством (плотностью) гидрофобных связей. Согласно предложенному в работах [5, 13] механизму, гидрофильные участки ГВ взаимодействуют с глинистыми минералами, а гидрофобные участки взаимодействуют друг с другом, связывая почвенные частицы в агрегате и обеспечивая как водоустойчивость, так и механическую устойчивость почвенной структуры. Следует отметить, что у этой гипотезы есть недостатки. В ней говорится об абстрактных ГВ, которые не имеют размеров и формы. Они должны входить в состав почвенных гелей, но в каком виде они находятся, какие физические механизмы определяют их положение в гелях, как правило, не рассматривается. Этот недостаток в определенной степени устраняется при рассмотрении почвенных гелей как образований, возникающих (существующих) в почвах на основе фрактальных кластеров размером 100–200 нм из первичных частиц ГВ размером 2–10 нм [9]. Однако четкой концепции о природе устойчивости почвенных агрегатов, доказанной экспериментами, в настоящий момент в почвоведении нет. Соответственно отсутствуют и общепринятые методы определения устойчивости. Так, недостаток четких физически обоснованных представлений о природе устойчивости нашел свое выражение в методах, применяемых для изучения, в частности свойства водоустойчивости почвенных агрегатов. Они отличаются по способу воздействия на агрегаты (как водного, так и механического) в виде качания сит, разрывного действия заземленного воздуха и др., наличие или отсутствие неконтролируемых факторов и методу фиксации результатов. Это характерно и для общеизвестных методов просеивания в стоячей воде (метод Саввинова), оценки скорости распада агрегатов в стоячей воде (метод Андрианова), разрушения агрегатов под ударными воздействиями капель воды [4, 8, 11, 18, 20, 21] и др. Все указанные методы имеют недостатки в виде воздействия неучтенных факторов (интенсивность механического воздействия сит, разрушающее действие заземленного воздуха и др.) и низкую производительность. Кроме того, оцениваемые величины не имеют физической размерности (это либо статистические показатели типа средневзвешенного диаметра, либо про-

цент водоустойчивых агрегатов  $>0.25$  мм, либо их комбинации), что делает невозможным использование этих показателей и результатов анализа в физически обоснованных прогностических математических моделях, они используются только в виде сравнительно-оценочной характеристики. Отметим, что обязательным действующим фактором при определении водоустойчивости является воздействие воды, вызывающее распад почвенных агрегатов на отдельные составляющие (микроагрегаты и почвенные частицы). В большинстве описанных методов определения водоустойчивости наряду с действием воды на агрегаты одновременно происходит и механическое воздействие той или иной природы. При действии только механических сил на агрегаты также происходит их разделение на отдельные части. В обоих случаях расклинивающими действиями воды и механических сил необходимо разорвать связи, удерживающие вместе части агрегатов. Логично предположить, что при механическом воздействии на водонасыщенные агрегаты нужно разорвать в них те же связи между частицами, которые определяют их водоустойчивость. В насыщенном водой состоянии энергия, необходимая для разрыва связей, должна быть близка вне зависимости от применяемого метода разрушения, и может являться характеристикой устойчивости почв. Можно предположить, что свойства водоустойчивости и механической устойчивости водонасыщенных образцов почв могут быть определены одним методическим приемом. С этих позиций перспективной представляется доработка метода Ребиндера, применяемого для выявления прочности связей в почвенных агрегатах [3]. Важно подчеркнуть, что механическая устойчивость (сопротивление сдвиганию или расклиниванию) существенно зависит от влажности почвенного агрегата [14, 15]. В связи с этим методическая проблема определения механической устойчивости должна решаться, как и в случае определения водоустойчивости, в водонасыщенном или близком к насыщению состоянии. Только в этом случае возможно получение общей физически обоснованной характеристики агрегатов в виде их устойчивости. Поэтому одной из задач работы было создание одинаковых с точки зрения состояния влажности условий определения устойчивости.

Цель работы – обоснование физического понятия устойчивости почвенных агрегатов при едином методическом приеме количественной оценки устойчивости как нормативной почвенной характеристики. Задачи работы: разработка высокопроизводительного метода определения устойчивости влагонасыщенных почвенных агрегатов к механическим и водным воздействиям; создание одинаковых с точки зрения состояния влажности условий определения устойчивости;

**Таблица 1.** Диапазоны устойчивости агрегатов горизонта Апах некоторых почв РФ, мН/агр

Почва	Место отбора, угодье	Количество образцов	Устойчивость агрегатов, мН/агр
Дерново-подзолистая	Московская область, Соколово, поля ФИЦ Немчиновка, озимая пшеница	5	$(17.5-19.3) \pm 1.7$
Серая лесная	Владимирская обл, окрестности г. Суздаль, поля Владимирского НИИСХ, яровая пшеница	1	$28.1 \pm 2.5$
Чернозем выщелоченный	Орловская область, Свердловский район, яровая пшеница	1	$36.1 \pm 3.6$
Чернозем типичный	Курск, Курский заповедник, некосимая степь	2	$31.2 \pm 0.5$
Каштановая	Иловлинский район, Волгоградская область, залежь	1	$19.9 \pm 1.9$
Серозем типичный	Почвенная коллекция Факультета почвоведения МГУ	1	$16.2 \pm 1.1$
Красно-коричневая (красноцветная)	Мыс Мартъян, Крым	3	$51.8 \pm 1.2$
Горно-луговая	Крым, Долгоруковская яйла	1	$35.1 \pm 1.0$
Бурозем	Крым, Долгоруковская яйла	1	$39.5 \pm 1.1$
Бурозем	Краснодарский край, Дагомыс, чайная плантация	1	$33.7 \pm 1.3$

оценка почвенных нормативных диапазонов свойства устойчивости насыщенных водой агрегатов для пахотных горизонтов различных типов; проверка корреляции данных, получаемых этим методом, с водоустойчивостью агрегатов, определяемых классическим методом Саввинова.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

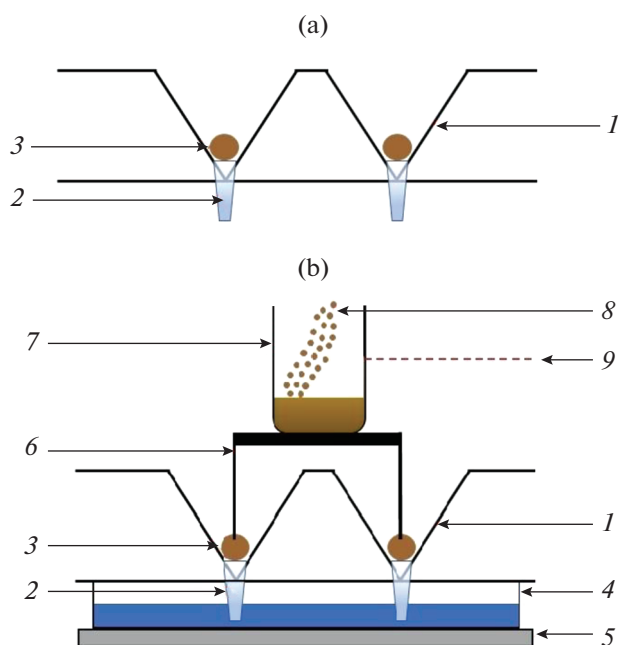
Объекты исследования – образцы почв, отобранные из гумусовых горизонтов с учетом различий в водоустойчивости почв, которая была оценена в ходе предварительных экспериментов [7] (табл. 1).

**Описание метода определения устойчивости агрегатов.** Практически во всех методах определения водоустойчивости почв выполняются обязательные условия – на увлажненные до близкой к полной влагоемкости агрегаты оказываются механические воздействия. Однако управлять этими воздействиями в большинстве применяемых в современном почвоведении методов сложно. Из теории решения изобретательских задач следует, что в соответствии с законами развития техники существует тенденция перехода от менее управляемых воздействий к более управляемым [1].

Одним из необходимых требований к методу определения устойчивости агрегатов являлось проведение высокопроизводительных экспериментов при одновременном определении на большом количестве агрегатов. В качестве воздействия на группу агрегатов выбрали рассечение лезвиями расположенных линейно агрегатов. Схематично установка для определения устойчи-

вости агрегатов изображена на рис. 1 и S1. В дальнейшем, для удобства будем употреблять в отношении этого метода определения устойчивости агрегатов словосочетание “метод лезвий”. Использование двух лезвий снижало вероятность их движения под углом относительно агрегатов. Рассечение близких к водонасыщению агрегатов лезвиями аналогично механизму пенетрации, описанному в литературе [12]. Оно представляет собой вариант определения предельного напряжения сдвига, то есть движение осуществляется по достижении напряжения, разрушающего связи.

При подготовке образцов агрегаты почв полевой влажности просеивали через сито с диаметром ячеек 4.5–5 мм и высушивали до воздушно-сухого состояния. Установлено, что получение агрегатов просевом высушенных или влажных (с последующим высушиванием) образцов значительно не влияет на их устойчивость. Одной из задач данной работы было создание управляемых и стандартизированных по влажности агрегатов условий определения. Эти гидрологические условия должны отвечать условиям проведения эксперимента: (1) быть близкими к насыщению агрегата водой, (2) строго контролируемыми и одинаковыми с точки зрения состояния влаги, (3) меняться при необходимости в контролируемых условиях. Для удовлетворения указанных требований определение проводили на агрегатах, которые были гидравлически связаны со свободной чистой водой хлопчатобумажными фитилями. Так, при длине фитиля 5 см, в агрегате поддерживалось давление почвенной влаги, равное –5 см водного столба. При необходимости можно было либо



**Рис. 1.** Схема кассеты с фитилями и агрегатами для определения устойчивости почвенных агрегатов (а) и 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.

увеличить, либо уменьшить величину этого “повешенного” давления влаги. Такого рода устройство с хлопчатобумажным фитилем действует в области давлений влаги от 0 до  $-15$  см водного столба (вплоть до давления входа воздуха), которое в суглинистых почвах может варьировать от  $-15$  см водного столба и выше. Это позволяло создавать в агрегатах постоянную влажность, близкую к величине насыщения, или, используя формальное выражение Ван Генухтена, физически строгой величины  $\Theta_s$  (давление влаги в этом случае будет равно высоте фитиля, который опущен в воду нижним концом, то есть  $-5$  см водного столба). Оно постоянно и может быть установлено. Кривая водоудерживания на этом участке параллельна оси давления влаги и несущественно (до величины давления входа воздуха в современном изображении ван Генухтена) меняет влажность агрегата. Влажность равна величине  $\Theta_s$ . Это придает стабильность условиям определения, независимость определения от величины влажности/давления влаги и высокую сравнимость полученных результатов при физически строгой величине  $-\Theta_s$ .

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. 1а). В нижней части уголка были размещены фитили из хлопчатобумажной ткани (рис 1а, 2). В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов<sup>2</sup> так, чтобы они касались друг друга.

Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении 15 кПа. Условия подобрали в ходе изучения водоустойчивости агрегатов в предварительных экспериментах. В качестве изученных параметров при удалении воздуха из агрегатов выступали время вакуумирования и величина разрежения. Очевидно, что между значением разрежения и временем существует корреляция: чем больше разрежение, тем меньше необходимо времени для удаления воздуха из агрегатов. Проведенные эксперименты показали, что при времени вакуумирования 15 мин и величине разрежения 15 кПа удается минимизировать разрушающее влияние заземленного воздуха, то есть значения водоустойчивости выходят на постоянный уровень.

Кассету с агрегатами в вакуумируемом эксикаторе закрепляли на трех парах 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. Из-за неодинаковой смачиваемости агрегатов различных почвенных типов, для каждого из них время капиллярного увлажнения подбирали индивидуально. Так, для образцов черноземов время увлажнения составило 30 мин, а его увеличение до 60 мин значительно не изменяло водоустойчивость.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом (рис. 1б, 4, 5), чтобы фитили под агрегатами обеспечивали сохранение насыщения их водой, достигнутое на этапе вакуумирования.

В связи с тем, что агрегаты были капиллярно насыщены водой и не контактировали со свободной водой, они из-за капиллярного давления без механического воздействия лезвий самопроизвольно не разрушались.

Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два

<sup>2</sup> Количество агрегатов, укладываемых в уголки, лимитировалось размерами емкости, в которой проводили их вакуумирование.

параллельно расположенных лезвия<sup>3</sup>, закрепленных на площадке (рис. 1б, 6), на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой (рис. 1б, 7). Использование двух лезвий обеспечивало устойчивость устройства при воздействии на агрегаты, а также увеличивало количество агрегатов, которые одновременно рассекали лезвия. Добавляя песок в стаканчик (рис. 1б, 8), повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов. Для исключения ошибок на мерную шкалу стаканчика направляли луч лазера (рис. 1б, 9), закрепленный на другом штативе. Это позволяло хорошо контролировать процесс прохождения лезвиями средней части агрегатов<sup>4</sup>.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонах (мН) на агрегат.

Для проверки корректности результатов, полученных предлагаемым методом, измеряли водоустойчивость тех же образцов методом ситового просеивания в стоячей воде по Саввинову (рис. 2).

**Статистический анализ.** Эксперименты методом лезвий 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% уровне значимости. Эксперименты по определению средневзвешенного диаметра агрегатов проводили в трехкратной повторности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

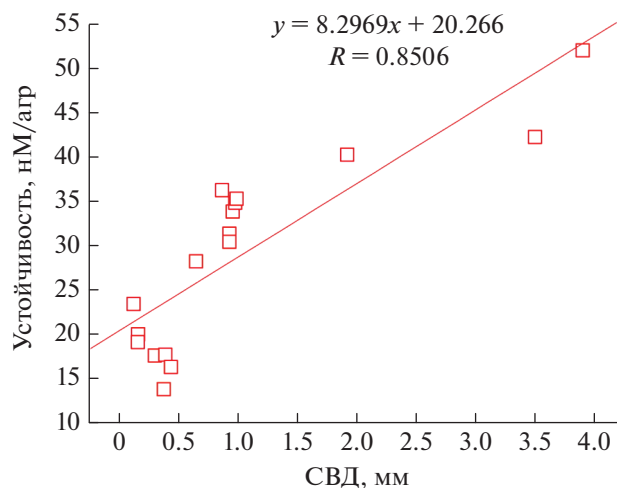
На наш взгляд, основными условиями для решения вопроса о возможности использования метода “лезвий” для определения водоустойчивости должны служить критерии:

1. Использование получаемых величин для характеристики устойчивости агрегатов гумусовых горизонтов почв в качестве критериального нормативного показателя.

2. Использование предлагаемого метода для оценки водоустойчивости, то есть определение соответствия получаемых известными методами результатов по водоустойчивости (метод Саввинова) с результатами, получаемыми методом “лезвий”.

<sup>3</sup> В качестве лезвий использовали канцелярские ножи, длина которых соответствовала длине линейно расположенных в кассете агрегатов.

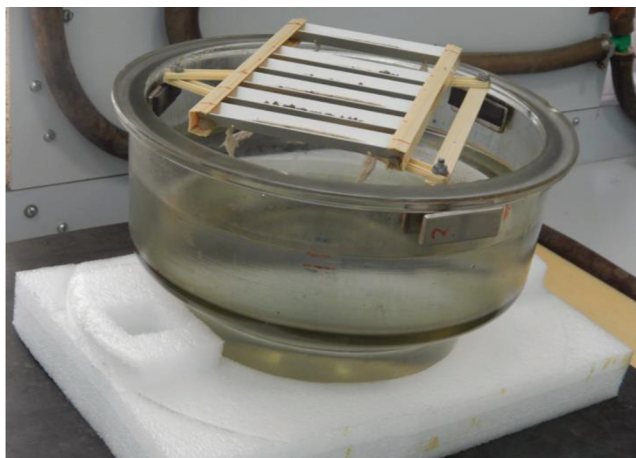
<sup>4</sup> Установлено, что изменение остроты лезвий не оказывало значимого влияния на предельное сопротивление разрушения агрегатов.



**Рис. 2.** Зависимость устойчивости агрегатов, исследованной методом “лезвий” (мН/агр), от водоустойчивости (средневзвешенный диаметр, СВД), исследованной методом Саввинова.

3. Оценка стабильности результатов, их воспроизводимости и производительности предлагаемого метода.

В табл. 1 показаны результаты определения устойчивости агрегатов гумусовых горизонтов пахотных почв, где устойчивость приведена в качестве диапазона получаемых в эксперименте величин. Устойчивость агрегатов, определенная методом “лезвий”, существенно различалась в исследованных образцах различных генетических типов почв РФ. Безусловно, трудно представить четкие диапазоны, свойственные разным типам почв, так как эта величина зависит от количества гумуса, его состава, возделываемой культуры и прочих агроусловий. Но очевидны два положительных момента: (1) полученные результаты количественно отражают специфику почвенных условий, различие агрегатов пахотных горизонтов почв разного генезиса и (2) весьма невысокие величины доверительных интервалов, что указывает на хорошую стабильность метода и воспроизводимость результатов определения устойчивости агрегатов. Второй момент понятен — практически все действующие на агрегат силы контролируются и количественно определяются. Стабильна и влажность агрегатов в рамках определения устойчивости для одного типа почв. Указанные моменты позволяют рекомендовать метод для мониторинга плодородия почв, слежения за их деградацией, касающейся, прежде всего, почвенных агрегатов, как важнейшей составляющей почвенного плодородия. Следует отметить высокую производительность предложенного метода “лезвий”, позволяющую заметно увеличить число повторностей и снизить время анализа.



**Рис. 3.** Фото устройства для определения устойчивости почвенных агрегатов.

Остановимся на проверке соответствия данных, получаемых этим методом, с водоустойчивостью агрегатов, определяемых классическим методом Саввинова. Данный подход, на первый взгляд, кардинально отличается по физике процесса от методов просеивания агрегатов в воде. Однако проведенное при помощи модифицированного метода Саввинова изучение влияния амплитуды колебаний сит на распад агрегатов в воде свидетельствует об обратном [7]. Установлено, что для процесса их разрушения при просеивании в воде существует предельная амплитуда вибрации, превышение которой резко ускоряет процесс распада агрегатов [7]. То есть превышение некой величины ударных воздействий сит на агрегаты заставляет их распадаться [7]. Это подтверждает предположение о том, что распад агрегатов в различных методах ситового анализа [7, 8, 16, 17] и метода “лезвий” определяется энергией, необходимой для разрыва внутриагрегатных связей. Для проверки корреляции данных по механической устойчивости водонасыщенных почвенных агрегатов с данными по водоустойчивости использовали применяемый метод Саввинова. Установлено, что полученные на одних и тех же образцах почв результаты хорошо коррелируют друг с другом. Коэффициент корреляции между определенным по методу Саввинова средневзвешенным диаметром и предельной нагрузкой разрушения по методу “лезвий” превышает 85% (рис. 3). Таким образом, результаты по водоустойчивости, полученные классическим методом распада агрегатов в воде, хорошо коррелируют с данными по предельным напряжениям разрушения агрегатов методом “лезвий” (устойчивости агрегатов), что свидетельствует о возможности использования этого метода как для оценки их устойчивости, так и для оценки их собственно водоустойчивости.

Итак, преимуществами метода “лезвий” при определении устойчивости и водоустойчивости агрегатов являются:

- метод физически обоснован, являяется размерным методом при строго физическом контроле и стабилизации условий определения;

- устойчивость и водоустойчивость выражаются одним экспериментально определяемым числом, имеющим ясный физический смысл – предельное напряжение разрушения связей в агрегате, измеряемое в ньютонах на агрегат (мН/агр);

- производительность метода на порядок больше (при определении водоустойчивости агрегатов методом Саввинова [3] эксперимент в одной повторности занимает 1 рабочий день; для пятикратной повторности потребуется рабочая неделя; в то же время метод “лезвий” позволяет определять водоустойчивость 4–5 образцов в шестикратной повторности в течение одного рабочего дня или 20–25 образцов в шестикратной повторности в неделю);

- стабильность определений, невысокие величины варьирования ошибки среднего, четкая приуроченность к определенным типам почв РФ позволяют рекомендовать величину устойчивости агрегатов, определенную данным методом, в качестве метода мониторинга плодородия почв, слежения за их деградацией, касающейся, прежде всего, почвенных агрегатов, как важнейшей составляющей почвенного плодородия.

Безусловно, дальнейшие усилия над усовершенствованием метода и введения его результатов в почвенные нормативные параметры, характеризующие физическое состояние устойчивости агрегатов потребуют дальнейших специальных исследований при подборе почв с разными качествами агрегатов, постановки серии экспериментов при различной степени деградации почв.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выдвинуто предположение, что водоустойчивость почвенных водонасыщенных агрегатов и их устойчивость к механическим воздействиям взаимосвязаны, так как отражают разрыв внутриагрегатных связей и могут быть определены одним методическим приемом.

2. Разработана высокопроизводительная методика определения сопротивления водонасыщенных почвенных агрегатов расклиниванию методом “лезвий”, имеющая физическое обоснование при строго контролируемых условиях и воздействующих факторах, дающая экспериментальные результаты по устойчивости агрегатов (мН/агр).

3. Корректность применения разработанной методики для оценки водоустойчивости воздушно-сухих почвенных агрегатов проверена путем сравнения результатов экспериментов с данны-

ми, полученными на одних и тех же почвенных образцах методом Саввинова (мокрое просеивание). Коэффициент корреляции >85%.

4. Предложенная величина и ее экспериментальное изучение позволяют характеризовать нормативные диапазоны устойчивости агрегатов различных типов почв РФ, а невысокая величина варьирования средних указывает на возможность использования данной величины и методики ее определения в качестве нормативной и позволяющей применять их при контроле деградации почв и мониторинге физического состояния гумусовых горизонтов различных почв.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность доценту А.П. Шварову, профессору Н.О. Ковалевой, старшему научному сотруднику О.А. Салимгареевой и аспирантке Р.А. Решетниковой Факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова за предоставление почвенных образцов для исследования.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке работы РНФ (проект № 22-14-00107).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтишуллер Г.С.* Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Новосибирск: Наука, 1986. 209 с.
2. *Антипов-Каратаев И.Н., Келлерман В.В., Хан Д.В.* О почвенном агрегате и методах его исследования. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Вершинин П.В.* Почвенная структура и условия ее формирования М.: Изд-во АН СССР, 1958. 188 с.
5. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
6. *Николаева Е.И.* Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям. Дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 104 с.
7. *Потапов Д.И., Ушкова Д.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Батырев Ю.П., Шалаев В.С.* О влиянии амплитуды вибрации на разрушение почвенных агрегатов при определении их водоустойчивости при ситовом анализе // Лесной вестник. 2022. № 2. С. 44–49. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-44-49>
8. *Рееут И.Б.* Физика почв. Л.: Колос, 1972. 368 с.
9. *Федотов Г.Н., Добровольский Г.В.* Возможные пути формирования наноструктуры в почвенных гелях // Почвоведение. 2012. № 8. С. 908–920.
10. *Фрид А.С., Кузнецова И.В., Кололева И.Е., Бондарев А.Г., Козут Б.М., Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А.* Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических, физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
11. *Хан К.Ю.* Энергетическая характеристика водоустойчивости почвенных агрегатов. Дис. ... докт. биол. наук. Пушино, 2012. 300 с.
12. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
13. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
14. *Шеин Е.В., Русанов А.М., Николаева Е.И., Хайдапова Д.Д.* Параметрическая оценка почвенно-физических функций // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2007. № 2. С. 47–52.
15. *Шеин Е.В., Русанов А.М., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Николаева Е.И.* Математические модели некоторых почвенных характеристик: обоснование, анализ, особенности использования параметров моделей // Почвоведение. 2013. № 5. С. 595–602.
16. *Almajmaie A., Hardie M., Acuna T., Birch C.* Evaluation of methods for determining soil aggregate stability // Soil Till. Res. 2017. V. 167. P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>
17. *Amezketta E., Singer M.J., Le Bissonnais Y.* Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation // Soil Sci. Soc. Am. J. 1996. V. 60. № 3. P. 888–894. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030030x>
18. *Cerdà A.* Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia // Soil Till. Res. 2000. V. 57. № 3. P. 159–166. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00155-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00155-0)
19. *Ghezalbash E., Hossein Mohammadi M., Shorafa M.* Investigation of Soil Mechanical Resistance Threshold Values for Two Wheat Cultivars in a Loamy Sand Soil // J. Soil Sci. Plant Nutrition. 2022. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00864-2>
20. *Haynes R.J., Swift R.S.* Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content // J. Soil Sci. 1990. V. 41. № 1. P. 73–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00046.x>
21. *Le Bissonnais Y.* Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology // Eur. J. Soil Sci. 1996. V. 47. № 4. P. 425–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
22. *Lu G., Sakagami K.I., Tanaka H., Hamada R.* Role of soil organic matter in stabilization of water-stable aggregates in soils under different types of land use // Soil Sci. Plant Nutrition. 1998. V. 44. № 2. P. 147–155. <https://doi.org/10.1080/00380768.1998.10414435>

23. *Piccolo A.* The supramolecular structure of humic substances // *Soil Sci.* 2001. V. 166. № 11. P. 810–832. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00007>
24. *Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P.* Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon // *Biogeochemistry.* 2018. T. 137. № 1. P. 27–49. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>
25. *Schjonning P., Lamandé M., Munkholm L.J., Lyngvig H.S., Nielsen J.A.* Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils // *Soil Till. Res.* 2016. V. 163. P. 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.003>
26. *Šimanský V., Jonczak J.* Aluminium and iron oxides affect the soil structure in a long-term mineral fertilised soil // *J. Soils Sediments.* 2020. V. 20. № 4. P. 2008–2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02556-4>
27. *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. P. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.009>
28. *Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Kogut B.M.* Humic substances: hypotheses and reality (a review) // *Eurasian Soil Sci.* 2021. V. 54. № 12. P. 1826–1854. <https://doi.org/10.1134/S1064229321120164>

## Stability of Arable Soil Aggregates: Experimental Determination and Normative Characteristics

**D. A. Ushkova<sup>1</sup>, U. A. Konkina<sup>1</sup>, I. V. Gorepekin<sup>1</sup>, D. I. Potapov<sup>1</sup>,  
E. V. Shein<sup>1</sup>, and G. N. Fedotov<sup>1, \*</sup>**

<sup>1</sup>*Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

Soil stability in modern soil physics is divided into two directions: water stability and resistance to mechanical influences (compression, wedging). Both soil properties in water-saturated soil are based on the rupture of intra-aggregate interparticle bonds, however, no standard physically justified values have been proposed to characterize the stability of aggregates. The purpose of the article is to substantiate the physical concept of stability of soil aggregates and to propose a single methodological method for quantifying stability as a normative soil characteristic. A high-performance method has been developed based on the dissection of linearly arranged water-saturated aggregates using blades under controlled load. The main stages of the technique are vacuuming of aggregates to eliminate the uncontrolled influence of trapped air, saturation of aggregates in vacuum with water and subsequent determination of the aggregates stability to penetration of blades. Experimental stability values (mN/aggregate) were obtained for 17 soils, which made it possible to form normative ranges for mountainous arable heavy loamy soils: sod-podzolic – 17–19, gray forest – 27–29, chernozems – 34–37 mN/agr and a number of other soils, which makes it possible to apply the obtained value as a soil characteristic of the stability of aggregates. The possibility of using the stability values as a methodological basis for monitoring soil stability and degradation, quantitative directions for assessing the state of physical characteristics of soil aggregates (first their main parameter, their stability) is discussed. Taking into account the highly correlative dependence of the proposed stability characteristic on the water stability values obtained by the Savvinov method (>85%) and the high performance of the stability determination method (the proposed method is about 20 times more productive than the Savvinov method), the possibilities of using the method and the obtained values of the stability of aggregates as a general physical characteristic and a separate well for quantifying water stability are discussed.

*Keywords:* soil aggregate, water stability, resistance to wedging