

УДК 631.4

ВЛАЖНОСТЬ РАЗРЫВА КАПИЛЛЯРОВ ПОЧВ И ЕЁ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

© 2025 г. Г. Н. Федотов^{1,*}, член-корреспондент РАН С. А. Шоба¹, И. В. Горепекин¹, А. И. Сухарев¹,
Д. А. Тарасенко¹, А. П. Шваров¹, З. Тюгай¹

Поступило 26.07.2024 г.

После доработки 05.09.2024 г.

Принято к публикации 09.09.2024 г.

Влажность разрыва капилляров характеризует нижнюю границу области наиболее продуктивной для растений влаги. Анализ экспериментальных методов определения влажности разрыва капилляров свидетельствует об их трудоёмкости и низкой производительности. Целью исследования являлась разработка высокопроизводительного и точного метода определения влажности разрыва капилляров. В работе использованы 18 образцов различных почв. Для определения влажности разрыва капилляров предложен метод, в ходе которого образцы почв помещали в воронку Шотта, увлажняли избытком воды, после чего откачивали воду при помощи водоструйного насоса. По мере удаления воды из образца увеличивался интервал между каплями, падающими с воронки. Индикатором конца эксперимента считали скачок в интервалах между падением капель. Эксперименты показали, что влажность разрыва капилляров почв по методу вакуумирования коррелирует с рассчитанными по наименьшей влагоёмкости почв (по Долгову) значениями на 87%. Значения влажности разрыва капилляров, полученные методом секущих (по Воронину) для некоторых из почвенных образцов, не выпадают из полученной зависимости. При помощи метода было показано, что высушивание почв приводит к уменьшению величины измеряемой влажности разрыва капилляров. Предложено объяснение результатов с позиции наличия в почвах органоминеральных гелей.

Ключевые слова: почвенные гидрологические константы, высушивание почв под вакуумом, наименьшая влагоёмкость почв

DOI: 10.31857/S2686739725010209 EDN: GUOSJD

Почвенно-гидрологические константы — это характерные для каждой почвы значения влажности, которые используют при практических расчётах запасов и движения воды в почвах [1–3].

Перемещение воды наиболее активно происходит по макрокапиллярам почв в интервале между полной и наименьшей влагоёмкостями. После стекания воды из макрокапилляров скорость её движения резко снижается, а преимущественные потоки воды идут уже по мезо- и микрокапиллярам. Это происходит в интервале между наименьшей влагоёмкостью и влажностью разрыва капилляров (ВРК) — диапазоне наиболее продуктивной для растений влаги. Снижение влажности ниже ВРК приводит к нарушению

гидравлической связи между почвенными капиллярами и распаду на отдельные капилляры [1, 2]. Они частично заполнены водой и разединены заполненными воздухом капиллярами, в которых вода существует в виде плёнок [2].

Подходы к определению ВРК разнятся. В методе высоких колонн по А.Ф. Лебедеву предложено наполнять почвой трубки и увлажнять почву до промачивания [4]. Далее послойно определяют влажность почвы в трубке. В верхней части, где вода удерживается молекулярными силами, влажность наименьшая. Её и называют влажностью разрыва капилляров. Высокая трудоёмкость и низкая производительность метода ограничивают возможность его широкого лабораторного использования.

Другой подход предложен в методе Долгова–Мацкевич [5]. При влажности почвы выше ВРК почвенный раствор перемещается к поверхности — зоне испарения — на которой появляется налёт соли, содержащейся в почвенном

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

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

растворе. Если влажность ниже ВРК, то соль не появляется на поверхности почвы. При отборе серии образцов с разным количеством почвенного раствора с солью можно определить ВРК — влажность первого в серии образца, на котором не выступит раствор соли. Недостатком данного метода также являются его трудоёмкость и низкая производительность.

По нашему мнению, наиболее перспективным является метод определения ВРК по излому, появляющемуся на кривой скорости сушки почвенных образцов [6]. Увлажненные образцы почв нагревают, а потерю воды фиксируют на весах непрерывного взвешивания. Исследователи получают набор точек, на основе которых строят график зависимости влажности образца от скорости сушки. Анализ подобных кривых показывает, что разброс данных сглаживает излом, а увеличение количества точек значительно снижает производительность метода.

Общим для этих методов является то, что любая почва при высушивании достигает ВРК. Поэтому приоритетной задачей становится выбор сигнала о достижении почвенным образцом этой влажности. Подобным маркером может быть резкое замедление скорости высушивания почвы.

Целью исследования являлось создание экспериментального высокопроизводительного и точного метода определения ВРК.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали образцы, отобранные из различных горизонтов (таблица):

- дерново-подзолистой почвы (Московская область);
- серой лесной почвы (Тульская область);
- чернозёма выщелоченного (Орловская область);
- чернозёма обыкновенного (Воронежская область);
- каштановой почвы (Волгоградская область).

Образцы почв разделили на две группы: первую высушивали до воздушно-сухого состояния, а вторую сохраняли при влажности отбора (между наименьшей влагоёмкостью и ВРК).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения расчётных значений ВРК образцов определяли наименьшую влагоёмкость почв по методу Долгова [7]. Образец

почвы насыпали в алюминиевую трубку диаметром 40 мм¹ и высотой 100 мм. Для обеспечения постоянного насыпного веса образец уплотняли вибрацией, после чего насыщали водой в течение суток до полной влагоёмкости помещением в стакан с водой на 1 сутки. Затем образцы ставили на влажный песок на 3 суток для стекания гравитационной воды. Эксперименты проводили в 3-х кратной повторности. После этого рассчитывали ВРК по формуле, применяемой для суглинистых почв: $ВРК = 0.7 НВ$.

Зависимость капиллярно-сорбционного потенциала воды от влажности почвы — основной гидрофизической характеристики (ОГХ) — определяли тензиометрическим методом в зондовом варианте [8]. На основе данных ОГХ рассчитывали ВРК методом секущих в соответствии с методикой, описанной в работе [2].

Влажность почвенных образцов определяли на приборе фирмы “Ohaus” MB23.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для удаления влаги из почв в ходе определения ВРК мы использовали вакуумирование. Навеску почвы массой 100 г помещали в стеклянный фильтр — воронку Шотта № 4, который устанавливали на колбу Бюхнера, присоединённую к водоструйному насосу. Для образования капиллярной связи между всеми частицами почвенного образца почву увлажняли избытком воды — 50 г. Затем включали водоструйный насос. Вода проходила через почву, затем через стеклянный фильтр и стекла с нижней части воронки Шотта в виде струи, а затем по каплям. Когда на поверхности образца уже не было воды, в почву начал поступать воздух. Он за счёт разрежения фильтровался через слой почвы и проталкивал по капиллярам воду. По мере удаления воды из образца увеличивался интервал между каплями, падающими с воронки Шотта (рис. 1). Индикатором конца эксперимента считали скачок в интервалах между падением капель (см. рис. 1). По достижении скачка водоструйный насос отключали. В пробе из среднего слоя почвенного образца определяли влажность, которая по физическому смыслу, т.е. замедлению движения воды по образцу, соответствовала ВРК.

¹ Для практического удобства в работе используется система СГС, кратные и внесистемные единицы измерения.

Таблица. Образцы почв, использованные в работе и значения их влажности разрыва капилляров

№	Почва	Горизонт отбора	Пробоподготовка	Расчетная ВРК, %	Экспериментальная ВРК, %
1	Дерново-подзолистая почва (пашня)	A	Высушенная увлажнённая	23.7±0.5	17.4±0.4
2	Дерново-подзолистая почва (пашня)	A	Исходная	21.0±0.8	20.1±0.6
3	Дерново-подзолистая почва (пашня)	A	Высушенная увлажнённая	23.6±0.3	19.9±0.2
4	Серая лесная (лес)	A	Высушенная увлажнённая	32.9±0.7	25.5±0.9
5	Серая лесная (лес)	A	Исходная	37.3±1.3	31.5±0.12
6	Серая лесная (пашня)	BEL	Высушенная увлажнённая	28.6±0.4	23.4±0.2
7	Серая лесная (пашня)	BT	Высушенная увлажнённая	28.3±0.3	23.0±0.7
8	Серая лесная (пашня)	BC	Высушенная увлажнённая	29.5±0.8	25.2±0.4
9	Серая лесная (лес)	BT	Высушенная увлажнённая	27.2±0.5	26.7±1.0
10	Серая лесная (лес)	BC	Высушенная увлажнённая	17.6±0.4	20.5±0.9
11	Чернозём выщелоченный (залежь)	A	Высушенная увлажнённая	39.4±0.8	31.6±0.9
12	Чернозём выщелоченный (залежь)	A	Исходная	35.7±1.3	35.0±0.35
13	Чернозём обыкновенный (пашня)	AUB	Высушенная увлажнённая	42.8±0.1	38.5±0.7
14	Чернозём обыкновенный (лесополоса)	B ₁ ca	Высушенная увлажнённая	29.8±1.3	28.3±0.1
15	Чернозём обыкновенный (лесополоса)	BC	Высушенная увлажнённая	34.3±0.7	30.3±0.3
16	Каштановая почва (залежь)	A	Высушенная увлажнённая	300±0.6	21.5±0.4
17	Каштановая почва (залежь)	AJ	Высушенная увлажнённая	34.7±1.2	24.9±0.2
18	Каштановая почва (пашня)	BC	Высушенная увлажнённая	24.6±0.5	22.0±0.2

Так как воздух, проходящий через слой почвы, дополнительно подсушивает образец, это вносит в результаты измерений искажения (рис. 2). Для их устранения, проходящий через почвенный образец воздух, предварительно насыщали парами воды, барботируя воздух через воду.

На следующем этапе работы мы изучили влияние величины разрежения на определяемую величину ВРК. Установлено, что в интервале от -0.2 до -0.8 атм измеряемая величина ВРК не меняется.

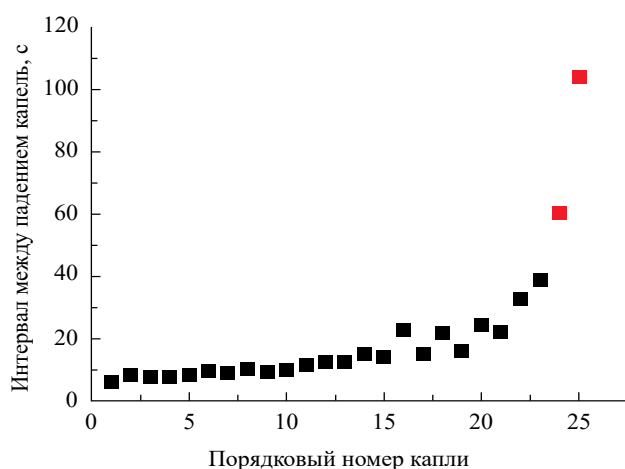


Рис. 1. Зависимость интервала времени между падением капель с воронки Шотта от порядкового номера капли

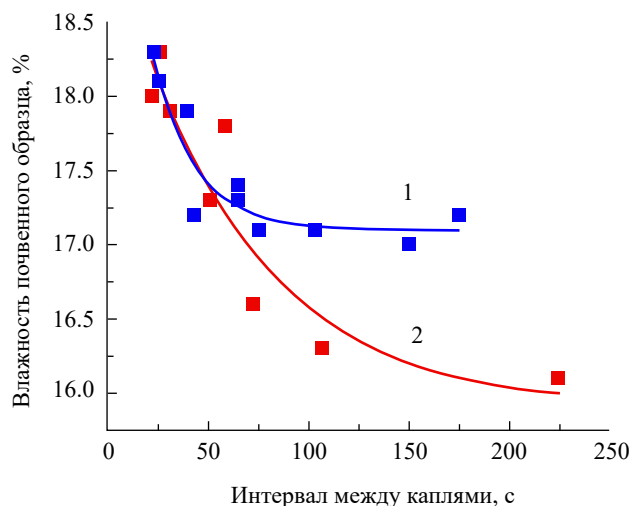


Рис. 2. Изменение влажности почвенного образца (ВРК) от интервала времени между падающими с воронки Шотта каплями при прохождении через образец дерново-подзолистой почвы влажного (2) и сухого (1) воздуха

Для проверки корректности предложенного метода мы сравнили результаты определения ВРК методом вакуумирования с расчётным способом оценки ВРК через величину наименьшей влагоёмкости. Экспериментальные результаты коррелируют с расчётными значениями с коэффициентом корреляции 87% (таблица, рис. 3).

С целью дополнительной проверки полученных данных для некоторых образцов величины ВРК рассчитали методом секущих после определения тензиометрической части основной гидрофизической характеристики. Точки для образцов, полученные методом секущих, не выпадают из полученной зависимости (см. рис. 3), что подтверждает корректность использования метода вакуумирования для определения ВРК почв.

При использовании нового метода было изучено влияние влажности серой лесной почвы на величины её ВРК (рис. 4). В опытах использовали не подвергавшуюся высушиванию почву, которую медленно высушивали и отбирали образцы для определения ВРК. Равномерность удаления воды по образцу обеспечивали путем помещения исходной почвы в емкость объемом 5 л, закрытую хлопчатобумажной тканью. Саму ёмкость помещали в условия влажности воздуха, близкой к 100%. Ежедневно почву перемешивали.

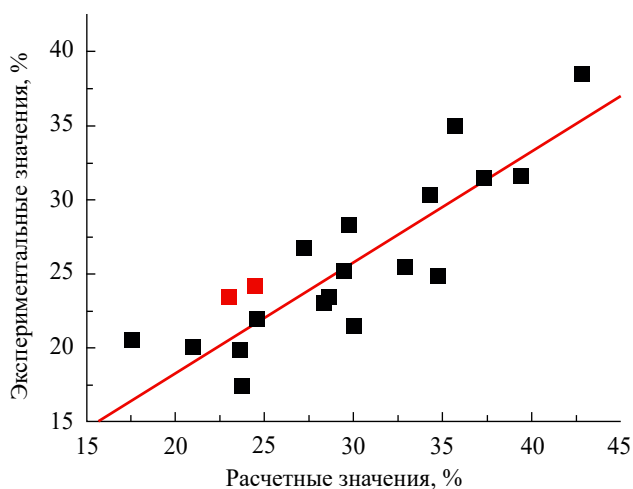


Рис. 3. Зависимость между экспериментальными значениями влажности разрыва капилляров методом вакуумирования и расчётными значениями. Красным цветом выделены точки, полученные методом секущих

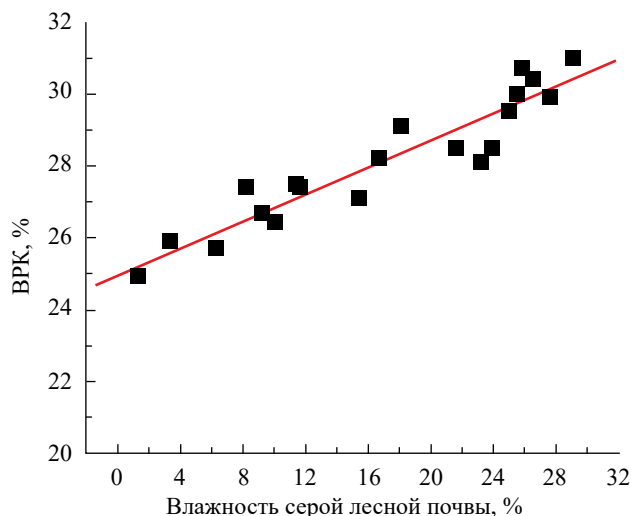


Рис. 4. Влияние влажности образцов серой лесной почвы на определяемые значения влажности разрыва капилляров (ВРК)

Полученные данные свидетельствуют, что высушивание приводит к уменьшению величины ВРК почв. Это ставит под сомнение предлагаемый в настоящее время в физической модели почв² [2] механизм возникновения ВРК, основанный на существовании воды при ВРК в виде плёнок на поверхности твёрдых почвенных частиц [2, 5]. При наличии гидрофильных и гидрофобных участков на поверхности почвенных частиц следует ожидать, что плёнки будут располагаться на гидрофильных поверхностях. Однако каким образом меняется доля гидрофильных участков на поверхности почвенных частиц при снижении влажности почв? С позиции трёхфазной модели почв ответить на этот вопрос достаточно трудно.

С позиций гелевой модели почв [9] в основе почвенной структуры лежат взаимодействия между надмолекулярными образованиями, основой которых являются связанные друг с другом фрактальные кластеры из частиц-молекул гуминовых веществ [11–14] с мозаичной дифильной поверхностью [15].

В почвах гелевая структура представляет собой образование, состоящее из ажурного каркаса (фрактальные кластеры, связанные между собой) и воды, заполняющей пустоты. Во влажных почвах ветви фрактальных кластеров сцепляются

между собой гидрофобными участками, а гидрофильные обращены к воде. При высушивании почв кластеры стягиваются и плотнее проникают ветвями друг в друга. В результате уменьшается толщина гелевого слоя, состоящего из кластеров. Структура геля уплотняется, а объём воды, который может вместить гель, уменьшается. Этим можно объяснить снижение влажности разрыва капилляров при высушивании почв.

ВЫВОДЫ

Предложен высокопроизводительный метод определения влажности разрыва капилляров, основанный на удалении воды из почвенного образца при помощи вакуума. Данные, полученные с помощью этого метода, коррелируют с расчётными значениями на 87%.

При помощи предложенного метода показано, что исходная влажность образца влияет на величину определяемой влажности разрыва капилляров.

Предложена гипотеза формирования влажности разрыва капилляров с позиции наличия в почвах органоминеральных гелей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Д. И., Шахова О. А. Динамика влажности чернозема, выщелоченного при различных системах обработки под яровую пшеницу в условиях Северного Зауралья // Аграрный вестник Урала. 2010. № 1 (67). С. 38–40.
2. Шеин Е. В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. 430 с.
3. Novák V., Hlaváčková H. Applied soil hydrology. Cham, Switzerland: Springer, 2019. 342 p.
4. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. 2-е изд. М., 1973, 1969. 399 с.
5. Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1984. 204 с.
6. Честнова В. В. Реологические свойства черноземов типичных курской области: взаимосвязь с физическими свойствами и основной

² Физическая модель почв основана на том, что почва образована твёрдой, жидкой и газообразной фазами. Данная модель не использует для объяснения почвенных процессов информацию о надмолекулярной организации гуминовых веществ [9] и наличия в почвах органоминеральных гелей, основой которых являются гуминовые вещества [9, 10].

- гидрофизической характеристикой / Дис. ... канд. биол наук: 06.01.03. М., 2017. 116 с.
7. Методическое руководство по изучению почвенной структуры / Под ред. И. Б. Ревута, А. А. Роде. Л.: Колос, 1969. 528 с.
 8. Шеин Е. В., Архангельская Т. А., Гончаров В. М., Губер А. К., Початкова Т. Н., Сидорова М. А., Смагин А. В., Умарова А. Б. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: методическое руководство. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2001. 200 с.
 9. Федотов Г. Н., Шеин Е. В., Ушкова Д. А., Салимгареева О. А., Горепекин И. В., Потапов Д. И. Надмолекулярные образования из молекул гуминовых веществ и их фрактальная организация // Почвоведение. 2023. № 8. С. 903–910.
 10. Тюлин А. Ф. Органно-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.
 11. Angelico R., Colombo C., Di Iorio E., Brtnický M., Fojt J., Conte P. Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation — Is there time for a new paradigm? // Appl. Sci. 2023. V. 13. № 4. P. 2236.
 12. Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // Eur. Biophys. J. 1992. V. 21. № 3. P. 163–167.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Милановский Е. Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
 16. Старцев В. В., Дымов А. А. Амфифильные свойства и водорастворимые компоненты органического вещества почв приполярного Урала // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1492–1505.

A POINT OF LIMITED AVAILABILITY OF WATER IN SOIL AND ITS DETERMINATION

© 2025 G. N. Fedotov[#], Corresponding Member of the RAS S. A. Shoba, I. V. Gorepekin,
A. I. Sukharev, D. A. Tarasenko, A. P. Shvarov, Z. Tyugai

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

The point of limited availability of water (PLAW) characterizes the lower boundary of the area of the most productive moisture for plants. The analysis of experimental methods for determining PLAW indicates their labor intensity and low productivity. The aim of the study was to develop a high-performance and accurate method for determining PLAW. 18 samples from various soils were used in the work. To determine the PLAW, a method was proposed in which soil samples were placed in a Schott funnel, moistened with excess water, and then the water was pumped out using a water jet pump. As the water was removed from the sample, the interval between drops falling from the funnel increased. A jump in the intervals between drops was considered an indicator of the end of the experiment. Experiments have shown that the soil moisture content obtained by vacuuming correlates with the values calculated for the lowest soil moisture capacity (according to Dolgov) by 87%. The values of the PLAW obtained by the secant method (according to Voronin) for some of the soil samples do not fall out of the obtained dependence. Using the method, it was shown that soil drying leads to a decrease in the value of the measured PLAW. An explanation of the results from the position of the presence of organomineral gels in soils is proposed.

Keywords: soil hydrological constants, soil drying under vacuum, the lowest soil moisture capacity