

УДК 631.43.+621.981
EDN TZKVCE

Моисеев К. Г.¹, Терлеев В. В.²

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГИДРОФИЗИКЕ ПОЧВ

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»;

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Реферат. Вододерживающая способность почвы описывается показателем, который называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ). Для расчета динамики почвенной влаги в ненасыщенной водой почве применяют уравнение Ричардса. Это дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа не имеет аналитического решения, так как коэффициенты этого уравнения, описывающие гидрофизические свойства почвы, являются переменными. Поэтому задача построения моделей, описывающих эти свойства почвы, сохраняет свою актуальность в настоящее время. Задачей данного исследования является применение фрактальной модели (Pore – Solid – Fractal (PSF)) к расчету матричного потенциала почвенной влаги. В качестве объектов исследования выбраны разновидности почв земледелия Ленинградской области. Отобраны образцы агродерново-подзолов, агродерново-подзолистого типичного и агродерново-подзолистого глееватой почвы (Podzols, Albic Retisols & Stagnic Retisols (WRB; FAO, 2015)). Экспериментальные значения давления почвенной влаги в зависимости от значений объемной влажности почвы измерены на прессе Ричардса. Фрактальную размерность D капиллярно-пористой среды – почвы вычисляли с использованием экспериментальных данных об общей пористости почв и распределении почвенных агрегатов и элементарных почвенных частиц по размерам. Все экспериментальные исследования проведены на основе общепринятых методик и ГОСТ. Расчетные величины давления получены при помощи модифицированной PSF-М модели. Для сопоставления экспериментальных и модельных кривых применена непараметрическая статистика – критерий Манна-Уитни. Вычисленные значения критерия варьировали от 7 до 11 в зависимости от доверительной вероятности (0,95–0,99), что значительно меньше критических значений критерия, равных в среднем 18–23. Фрактальная модель PSF-М с большой степенью сходимости описывает экспериментальные кривые ОГХ, статистика Манна-Уитни не показывает статистическую значимость их различий. Применение фрактальной модели PSF для моделирования гидрофизических свойств почв имеет широкие перспективы.

Ключевые слова: гидрофизические свойства, фракталы, давление почвенной влаги, вододерживающая способность почвы.

Для цитирования: Моисеев К. Г., Терлеев В. В. Применение фрактального моделирования в гидрофизике почв // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 3(31). С. 125–136. EDN: TZKVCE.

For citation: Moiseev K. G., Terleev V. V. Application of fractal simulation in soil hydrophysics // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 3(31). P. 125–136. EDN: TZKVCE.

Введение

Перенос воды в ненасыщенной влагой почве описывает уравнение, которое сформулировано Л. А. Ричардсом еще в 1931 г. [1]. Это дифференциальное уравнение не имеет аналитического решения по причине того, что два коэффициента этого

уравнения являются неизвестными функциями искомой переменной (давления влаги). Первый коэффициент носит название функции влагопроводности почвы. Второй коэффициент носит название функции дифференциальной влагоемкости почв. Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) по определению является первообразной (антидериwативом) по отношению к функции дифференциальной влагоемкости, поэтому для ОГХ применимо название «функции интегральной влагоемкости почвы». Непрерывные аппроксимации функций дифференциальной и интегральной влагоемкости (водоудерживающей способности), а также функции влагопроводности почвы могут быть определены на основе метода подбора кривых с использованием опытных данных по инфильтрации через почвенную колонку.

Форма кривой ОГХ специфична для каждого почвенного образца и характеризует структуру порового пространства почвы. Для водоудерживающей способности почв характерен гистерезис, то есть несовпадение форм кривых водоудерживающей способности при сорбции и десорбции влаги почвой. Некоторые новые и оригинальные подходы к математическому моделированию функции водоудерживающей способности, разрешению проблемы гистерезиса и физическому обоснованию эмпирических коэффициентов моделей водоудерживающей способности почв получили развитие в самое последнее время [2–6].

Общеизвестно, что почва является неоднородной средой. В среднем (в зависимости от цели исследования) выделяют пять–шесть уровней неоднородности почв. Например, неоднородность четвертого уровня – это неоднородность почв на молекулярном уровне. Неоднородности первого уровня сейчас дискутируются [7]. Это неоднородность, либо внутри элементарного почвенного ареала обусловленная микрорельефом, либо неоднородность элементарного ареала агроландшафта, почвенные мозаики, границы которых определяет различие в растительном покрове. Далее следуют неоднородности различной мощности почвенных горизонтов, микрон зон увлажнения или засоления почв, неоднородности внесения удобрений.

Менее известно, что все уровни геометрической и физической неоднородности почв находят отражение в едином пространстве самоаффинных структур, то есть почвенных структур разного уровня в известной мере являющихся копиями друг друга. Такую структурную организацию пространства рассматривает и описывает фрактальная геометрия. Структура почв (как единое пространство) по сути мультифрактал, части которого подобны целому. Аналогично и физические процессы, протекающие в таком пространстве, автомодельны. Любой физический процесс в почве (изменение поля влажности, температуры, электропроводности, миграция веществ по профилю или в пространстве) может быть представлен графически или непосредственно регистрируется аппаратурой в виде сигналов. Сигнал представляет собой непрерывную периодическую функцию, изменяющуюся по гармоническому закону. Все природные процессы на разных уровнях структурной организации почв имеют периодический характер. Несущая частота сигнала часто промодулирована сигналом более низкого уровня, а этот последний в свою очередь промодулирован сигналом еще более низкого порядка (рисунок 1). Иными словами, физический процесс в почве происходит сразу на нескольких структурных уровнях. Такая ситуация приводит к необходимости применения многомасштабного подхода к исследованию почв.

Авторы полагают, что в основу многомасштабного подхода к изучению физических процессов в почве следует заложить методы исследования фракталов, равно применимые к исследованию фрактальных и квазифрактальных явлений. Поровое пространство почвы моделируют геометрическими моделями, основанными на представлениях аффинного подобия; в этих моделях широко используют

представления фрактальной геометрии и фрактальной размерности порового пространства почвы [5, 6, 8].

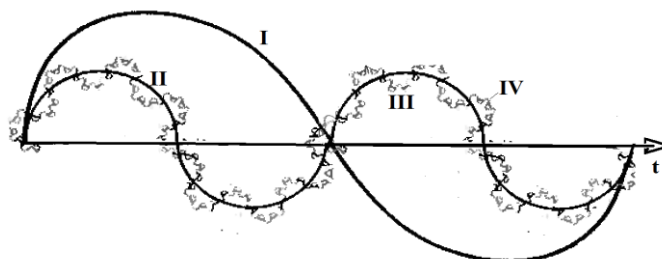


Рисунок 1 – Многмасштабная модуляция физических процессов в почве

Примечание. I, II, III, IV – гармоники физического процесса на разных структурных уровнях организации почвенного пространства.

В реальности в единице объема почв находим локальные области упорядоченной структуры, обладающие регулярностью и подобием, соседствующие с областями беспорядка, хаоса, обладающие самоафинностью. Модель структуры почвы – это мультифрактал с переменной фрактальной размерностью. Фрактальная размерность условно принимается постоянной для рассматриваемых в гидрофизике уровней текстурно-структурной неоднородности почвы. В пределах всего почвенного тела на уровне элементарных почвенных ареалов или микрорельефных неоднородностей поверхности почвы мы имеем возможность вводить понятие квазифрактала – геометрического объекта подобного фракталу, как бы фрактала.

Цель исследований – применение фрактальных моделей к вычислению водоудерживающей способности различных по гранулометрическому составу почв; апробация моделей и накопление фактического материала к пополнению баз почвенно-физических данных.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования выбраны разновидности почв землепользования Меньково (Гатчинский район Ленинградской области). Отобраны образцы по отдельным генетическим горизонтам следующих почв: агродерново-подзола на двучленных отложениях, водно-ледниковая супесь перекрывает морену (глубина смены пород 50 см), агродерново-подзола, агродерново-подзолистой типичной и агродерново-подзолистой глееватой почвы; Podzols, Albic Retisols и Stagnic Retisols (WRB; FAO, 2015). Средняя глубина взятия образцов по генетическим горизонтам почв 0–80 см.

Поскольку масса воды практически равна ее объему, постольку объемная и массовая фрактальные размерности структуры почвы при моделировании гидрофизических функций почв равны с некоторой степенью точности [6]. Для практического расчета фрактальных размерностей порового пространства почвы необходимо располагать данными распределения элементарных почвенных частиц по размерам, то есть провести гранулометрический и агрегатный анализы, определить плотность сложения и плотность твердой фазы почв, вычислить пористость.

Фрактальная размерность порового пространства почв в общем случае может быть рассчитана из соотношений [6, 8]:

$$\frac{M(< R_i)}{M_i} = \alpha^{D-E} \left(\frac{R_i}{L} \right)^{E-D}; R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max} \quad (1)$$

где: $\alpha < 1$ итерационный фактор; L – индикатор размера ($\alpha R_{max} = L$); M_i – общая масса фрагментов; E – Евклидова размерность объема, равная 3; D – фрактальная размерность; R_{max} , R_{min} – максимальный и минимальный размеры агрегатов диапазона полученных фракций структурной организации почвы; R_i – размер агрегатов i -го уровня структурной организации почвы.

В случае полной фрагментации (развитой структуры) почвы выражение (1) преобразуется к известным выражениям:

$$\gamma = \rho \cdot \left(\frac{\bar{R}}{R_{max}} \right)^{3-D}; P = 1 - \left(\frac{\bar{R}}{R_{max}} \right)^{3-D} \quad (2)$$

Здесь γ – плотность (сложения) сухой почвы; ρ – удельный вес частиц (плотность твердой фазы) почвы; P – пористость почв; \bar{R} – средний размер агрегатов почвы.

Отсюда (после преобразования и логарифмирования):

$$D = 3 - \frac{\lg \gamma - \lg \rho}{\lg \bar{R} - \lg R_{max}} \quad (3)$$

Фрактальную размерность почвы как капиллярно-пористой среды в этом исследовании вычислили по приведенным выше уравнениям с использованием экспериментальных данных о распределении почвенных агрегатов и элементарных почвенных частиц по размерам. Плотность сложения и плотность твердой фазы почв определяли на основе общепринятых методик. Методики изложены в соответствующих руководствах [9] (и ГОСТ 12536-2014, ГОСТ 5180-84, ГОСТ 17.4.3.01, ГОСТ 28268-89). С другой стороны, используя для почвенного порового пространства модель «губка Менгера», с определенной степенью общности можно принять фрактальную размерность единицы объема почвы равной 2,72 [8, 11].

Для фрактального моделирования главной ветви десорбции функции водоудерживающей способности использовали получившую широкую известность модель – pore solid fractal model (PSF, или её модифицированную версию PSF-M). Фрактальная модель PSF-M устраняет разрыв между физическими процессами в почве и их эмпирическими моделями и обеспечивает некоторую физическую основу параметров моделей функции влагопроводности [5, 6, 10, 11].

Для моделирования главной ветви десорбции водоудерживающей способности в капиллярной области увлажнения почвы определяли ОГХ методом прессы по общеизвестной методике [9]. Для значений влажности полученных при экспериментальном определении ОГХ рассчитали значения давления влаги, используя вычислительную процедуру модели PSF:

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{\left(\frac{\theta_0}{\theta} \right)^{\frac{1}{3-D}}} \quad (4)$$

Здесь φ – величины потенциала, или давления влаги и соответствующие ему величины объемной влажности почв θ (точки кривой водоудерживающей способности почв); φ_0 – измеренные экспериментально значения давления влаги, соответствующие некоторой объемной влажности θ_0 почвы, такой, что $\theta_0 < ПВ$ (полная влагоемкость почвы). Далее выразили вычисленные значения давления влаги в pF и построили зависимость $pF=f(\theta)$, которую сопоставили с экспериментально построенной зависимостью $pF=f(\theta)$. Значения φ_{min} вычисляют также по модели PSF при влагонасыщении почвы (ПВ) и часто выражают в значениях напора, так как эта величина может принимать положительные значения. Определены значения φ_{min} для ПВ во взятых к исследованию почвах.

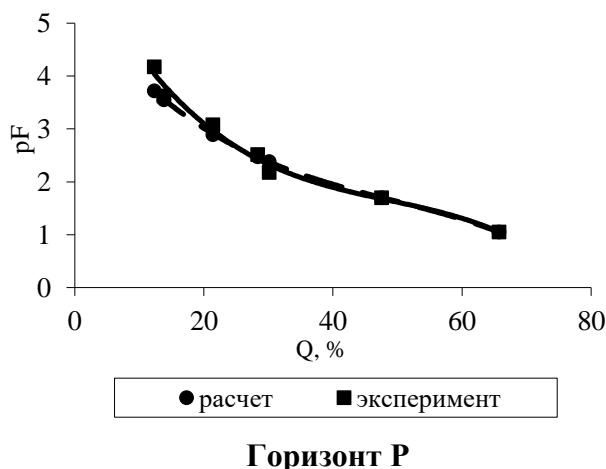
Результаты и их обсуждение

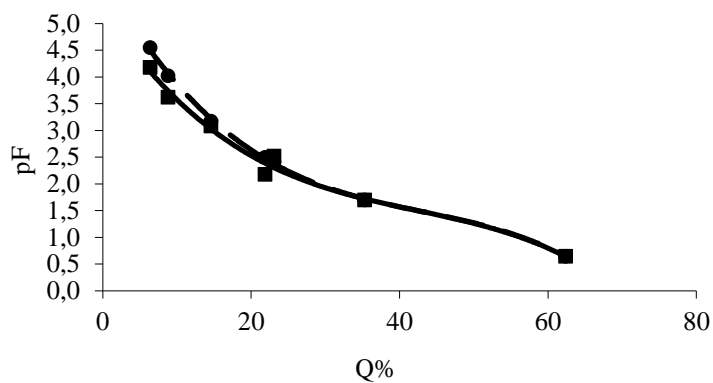
При реализации вычислительной процедуры давления влаги по модели PSF для функции водоудерживающей способности за нулевые значения приняты: значение давления (φ_0), равное 50 см вод. ст. ($pF=1,70$), и соответствующее φ_0 значение объемной влажности почвы (θ_0). Фрактальная размерность D , (степень $1/(3-D)$), общая пористость, объемная влажность, а также вычисленные значения давления влаги в условиях полного влагонасыщения почвы представлены в таблице 1. Плотность твердой фазы почв $2,65 \pm 0,04 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$; содержание агрегатов для гумусовых горизонтов в среднем $0,726 \text{ см}^3\cdot\text{см}^{-3}$; поправочный коэффициент на фрагментацию почвы при вычислении D равен 0,315.

Таблица 1 – Параметры почв, используемые для расчета давления почвенной влаги по модели PSF-M

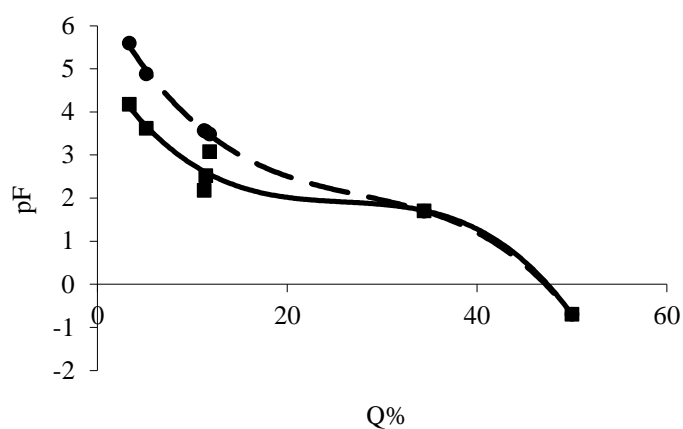
Отдел почв	Название типа почвы	Горизонт, мощность горизонта (см)	Объемная влажность почвы в точке φ_0 ($pF=1,70$) θ_0 , %	Общая пористость, %	D	$n=1/(3-D)$	φ_{min} см вод. ст.
Альфегумусные почвы	агродерново-подзол на двучленных отложениях	P (0-24)	47,5	46,3	2,71	3,44	11,3
		E (24-49)	35,3	38,0	2,74	3,85	4,0
		BHF (49-84)	34,4	36,9	2,74	3,87	0,2
	агродерново-подзол	P (0-32)	51,3	48,0	2,69	3,28	10,6
		E (32-53)	35,3	41,1	2,73	3,76	3,8
		BHF(53-107)	36,3	36,5	2,74	3,87	0,1
Текстурно-дифференцированные почвы	агродерново-подзолистая глееватая почва	P (0-36)	52,3	46,3	2,71	3,44	18,4
		BEL _g (36-57)	39,3	37,4	2,74	3,86	5,6
		BT _g (57-80)	39,6	41,5	2,73	3,74	5,6
	агродерново-подзолистая почва	P (0-28)	47,1	43,7	2,72	3,63	10
		BEL (28-55)	34,2	34,9	2,74	3,89	1,9
		BT (55-88)	31,0	28,7	2,74	3,82	5

Рассчитанные по модели PSF-M при заданной объемной влажности почвы и экспериментально измеренные ОГХ почв представлены на рисунках 2–5.



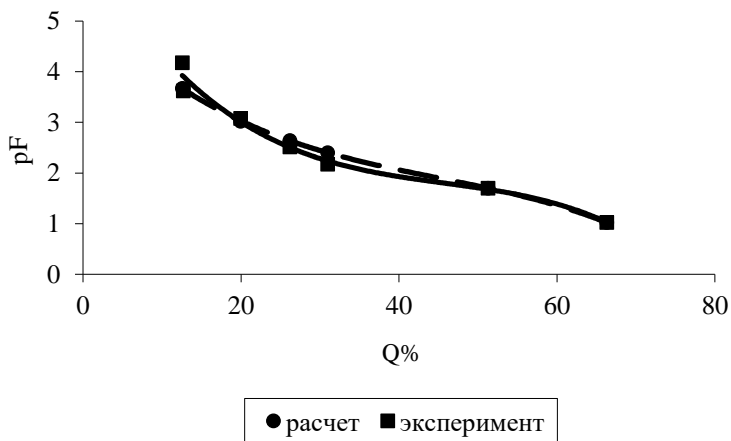


Горизонт E

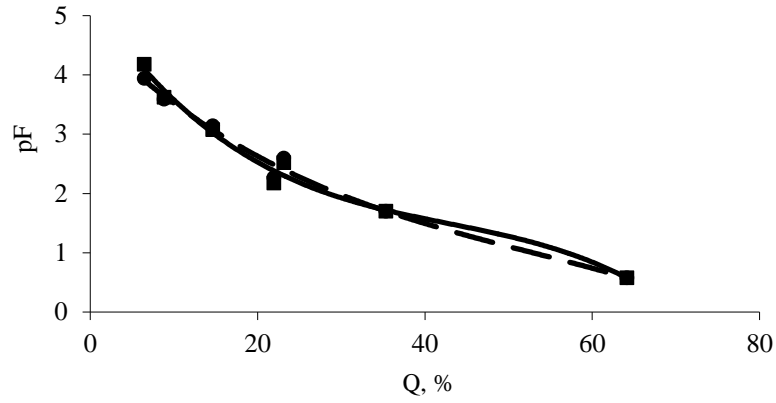


Горизонт BHF

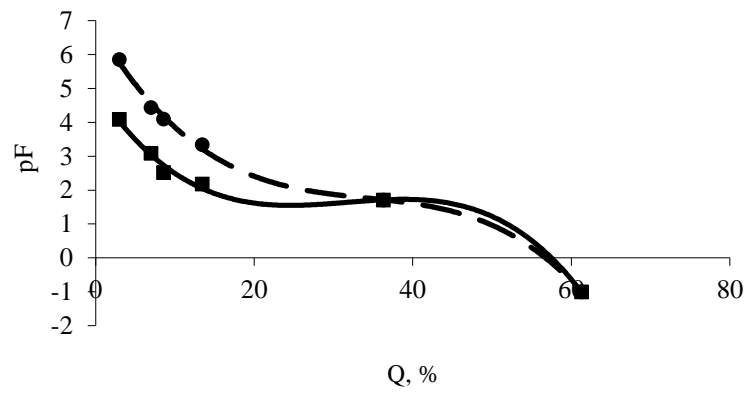
Рисунок 2 – Рассчитанные по модели PSF и экспериментально измеренные значения давления почвенной влаги для главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы: агродерново-подзол на двучленных отложениях (водно-ледниковые супеси/морена)



Горизонт P

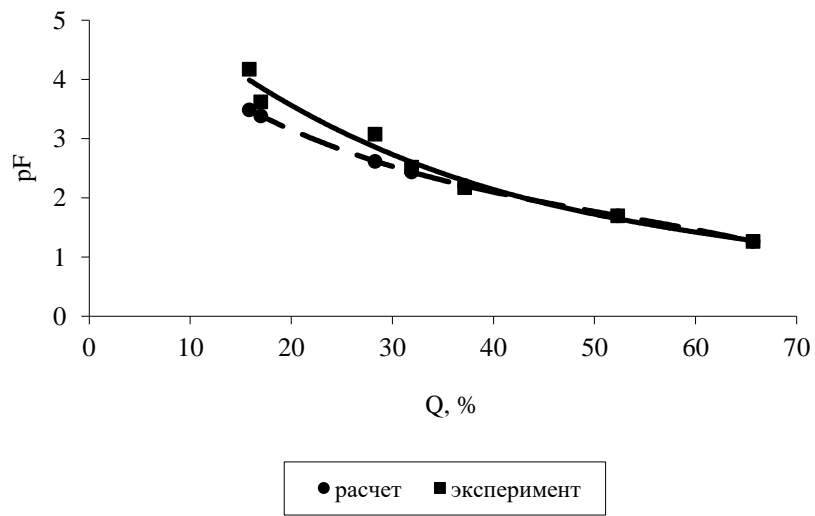


Горизонт E

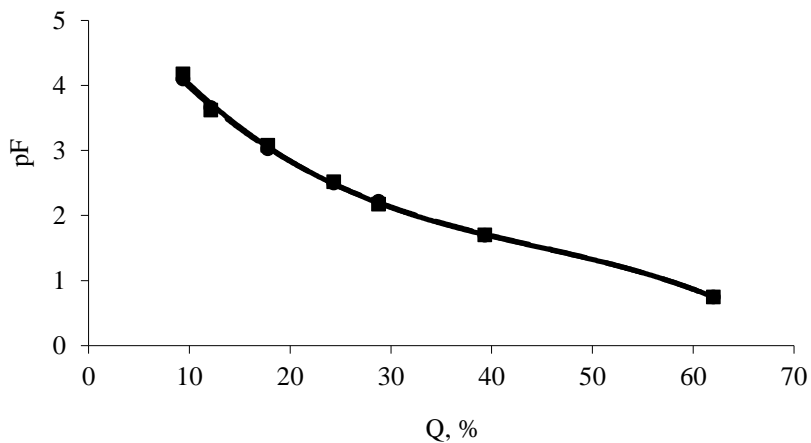


Горизонт ВНФ

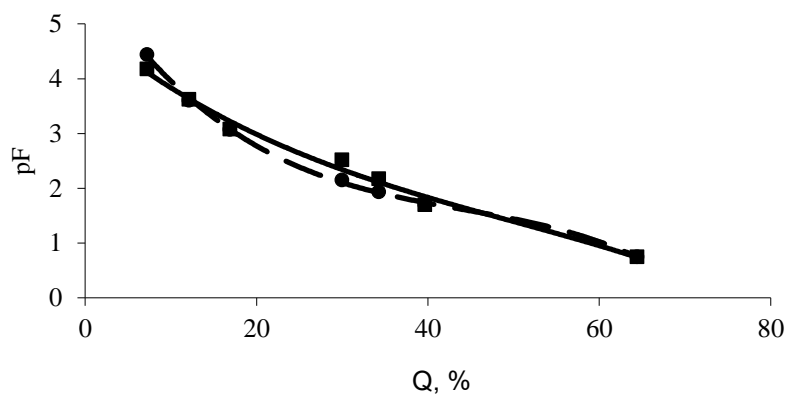
Рисунок 3 – Рассчитанные по модели PSF и экспериментально измеренные значения давления почвенной влаги для главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы: агродерново-подзол супесчаный



Горизонт P

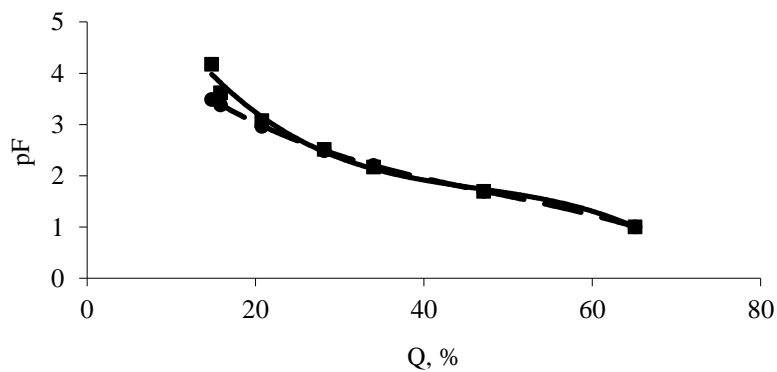


Горизонт BELg



Горизонт BTg

Рисунок 4 – Рассчитанные по модели PSF и экспериментально измеренные значения давления почвенной влаги для главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы: агродерново-подзолистая глееватая, супесчаная



● расчет ■ эксперимент

Горизонт P

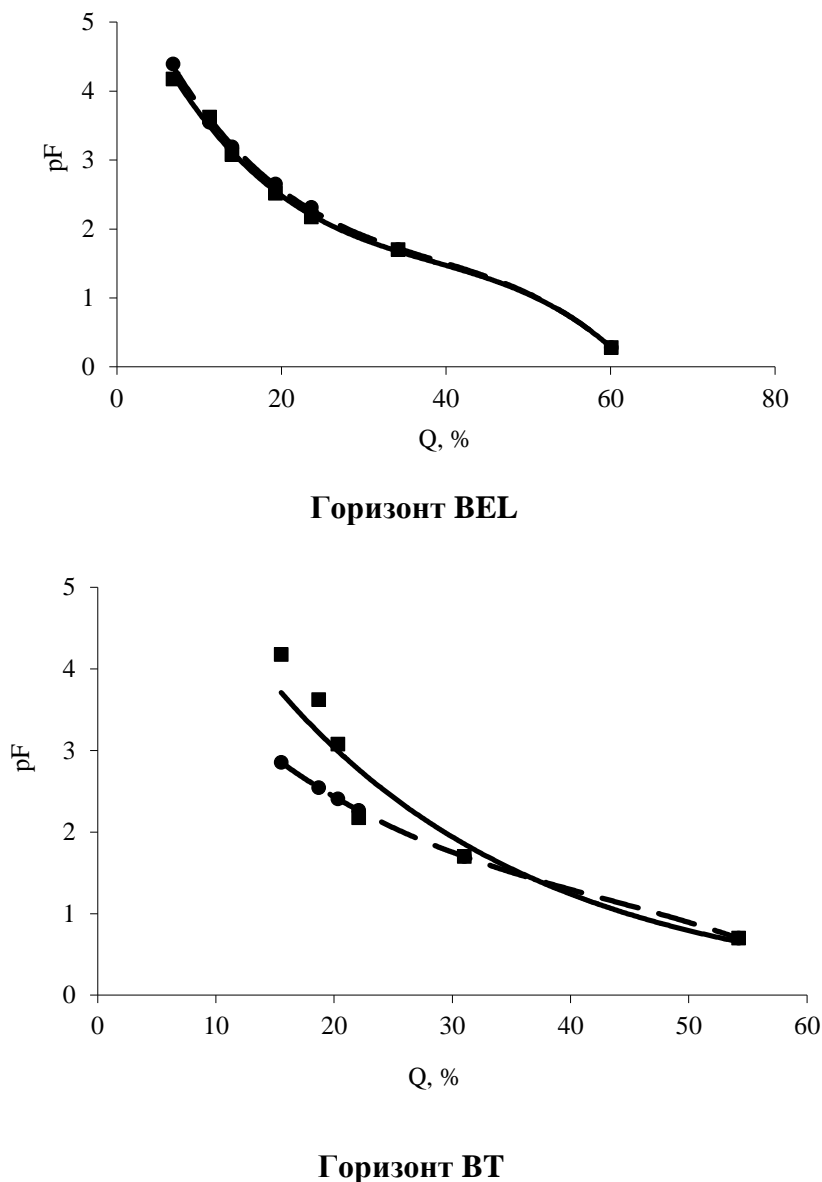


Рисунок 5 – Рассчитанные по модели PSF и экспериментально измеренные значения давления почвенной влаги для главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы: агродерново-подзолистая супесчаная

Как видно из рисунков, расчетные кривые проходят по точкам экспериментально измеренных ОГХ. Некоторая разница возникает в иллювиальных горизонтах почв. К сожалению, малые объемы выборок (5–7 точек) не позволяют уверенно применять общепринятые параметрические и непараметрические статистики для оценки ошибок моделирования и адекватности моделей. Поэтому применена непараметрическая статистика – критерий Манна-Уитни (U), применяемая для малых объемов выборки. Эмпирическое значение критерия U отражает, насколько велика зона совпадения между рядами данных. Поэтому чем меньше $U_{эмп}$, тем более вероятно, что различия достоверны.

Критические и эмпирические значения критерия представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения непараметрического критерия Манна-Уитни на уровне вероятности 0,95 при сопоставлении выборок экспериментальных и расчетных значений ОГХ

Почва	Агродерново-подзол на двучленных отложениях			Агродерново-подзол			Агродерново-подзолистая глееватая почва			Агродерново-подзолистая почва		
	Р	Е	ВНФ	Р	Е	ВНФ	Р	ВЕLg	ВТg	Р	ВЕL	ВТ
Генетический горизонт почвы												
Критерий Манна-Уитни	U эмп.	23	23	18	24	24	11	22	24	22	22	16
	Укр.	11	11	11	11	11	7	11	11	11	11	7

Таблица 2 показывает, что различия между расчетными и измеренными значениями давления не достоверны. Иными словами, фрактальная модель порового пространства почвы – PSF уверенно позволяет рассчитывать значения давления влаги и имеет большие перспективы для дальнейшего применения. Существенным недостатком данного моделирования является крайняя трудоемкость и недостаточная точность определения фрактальной размерности порового пространства почв на основе изучения распределений агрегатов и элементарных почвенных частиц по размерам. Большие перспективы имеет способ непосредственного экспериментального определения D развиваемый в исследованиях [5, 11, 12].

Выводы

Расчеты фрактальной размерности почвенного порового пространства, выполненные по данным агрегатного анализа – сухого рассева, анализа физических параметров (плотности твердой фазы, объемной плотности сухой почвы (плотности сложения)) показали вариацию этой величины в небольших пределах $2,69 \div 2,74$, что практически совпадает с фрактальной размерностью идеальной модели почвенной структуры губки Менгера.

Так как экспериментальные кривые ОГХ построены по 8–9 парам значений потенциала почвенной влаги – объемная влажность почв возникла необходимость применения непараметрического, редко используемого критерия согласия Манна-Уитни (U), который тем не менее, является мощной статистикой. Анализируется инверсия двух выборок. Критические значения U для всех объектов исследования в целом равны 11, а эмпирические значения варьировали от 16–23, чем меньше значение $U_{эмп}$, тем более вероятно, что различия достоверны. По критерию U значимых различий между экспериментально построенными и расчетными кривыми ОГХ не обнаружено.

Апробирован алгоритм расчета давления почвенной влаги для ветвей десорбции водоудерживающей способности отдельных типов альфегумусных и текстурно-дифференцированных почв по модифицированной фрактальной модели PSF.

Литература

1. Richards L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // *Physics*. 1931. No.1 (5). P. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
2. Ding Dy., Zhao Y., Feng H., Si B., Hill R. L. A user-friendly modified pore-solid fractal model // *Scientific Reports*. 2016. No. 6. Article No. 39029. DOI: 10.1038/srep39029.
3. Alfaro Soto M. A., Chang H. K., van Genuchten M. Th. Fractal-based models for the unsaturated soil hydraulic functions // *Geoderma*. 2017. No. 306. P. 144–151. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.07.019.
4. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Ginevsky R., Lazarev V., Topaj A., Moiseev K., Layshev K., Arkhipov M., Melnichuk A., Dunaieva I., Popovych V. Five models of hysteretic water-retention capacity and their comparison for sandy soil // *MATEC Web of Conferences*. International. Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018. 2018. Vol. 193. Art. No. 02036. DOI: 10.1051/mateconf/201819302036.

5. Моисеев К. Г., Терлеев В. В., Холохоренко М. В. Применение модели фрактальной фракции (PSF) для физического моделирования водоудерживающей способности почвы // Таврический вестник аграрной науки. 2018. № 2 (14). С. 76–88.
6. Ghanbarian B., Hunt A. G., Skinner T. E., Ewing R. P. Saturation dependence of transport in porous media predicted by percolation and effective medium theories. 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/276382932_Saturation_dependence_of_transport_in_porous_media_predicted_by_percolation_and_effective_medium_theories (дата обращения 05.06.2018).
7. Иванов Д. А., Карасева О. В., Рублюк М. В. Исследование влияния почвенного покрова и рельефа на продуктивность культур // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. С. 19–26. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10203.
8. Моисеев К. Г. Фракталы: анализ временных рядов в агрофизике // Сборник докладов заседаний Санкт-Петербургского отделения Общества почвоведов им. В. В. Докучаева «International Year of Soils». Санкт-Петербург: ООО «ВВМ». 2015. С. 3–13.
9. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 486 с.
10. Bird N., Perrier E., Rieu M. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions // European Journal of Soil Science. 2000. No. 51. P. 55–63. DOI: 10.1046/j.1365-2389.2000.00278.x.
11. Моисеев К. Г., Терлеев В. В. Моделирование структуры капиллярно-пористой среды и вычисление дифференциальной пористости почвы // Агрофизика. 2017. № 3. С. 43–56.
12. Моисеев К. Г., Терлеев В. В. Метод экспериментального определения фрактальной размерности порового пространства почв // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию со дня основания ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии «Инновационно-технологические основы развития адаптивно ландшафтного земледелия». Курск: ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2020. С. 283–288.

References

1. Richards L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // Physics. 1931. No.1 (5). P. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
2. Ding Dy., Zhao Y., Feng H., Si B., Hill R. L. A user-friendly modified pore-solid fractal model // Scientific Reports. 2016. No. 6. Article No. 39029. DOI: 10.1038/srep39029.
3. Alfaro Soto M. A., Chang H. K., van Genuchten M. Th. Fractal-based models for the unsaturated soil hydraulic functions // Geoderma. 2017. No. 306. P. 144–151. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.07.019.
4. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Ginevsky R., Lazarev V., Topaj A., Moiseev K., Layshev K., Arkhipov M., Melnichuk A., Dunaieva I., Popovych V. Five models of hysteretic water-retention capacity and their comparison for sandy soil // MATEC Web of Conferences. International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018. 2018. Vol. 193. Art. No. 02036. DOI: 10.1051/mateconf/201819302036.
5. Moiseev K.G., Terleev V.V., Kholokhorenko M.V. Application of fractal fraction model (PSF) for physical modeling of water-retention capacity of soil // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2018. No. 2 (14). P. 76–88.
6. Ghanbarian B., Hunt A. G., Skinner T. E., Ewing R. P. Saturation dependence of transport in porous media predicted by percolation and effective medium theories. 2018. [Electronic resource]. Access point: https://www.researchgate.net/publication/276382932_Saturation_dependence_of_transport_in_porous_media_predicted_by_percolation_and_effective_medium_theories (reference's date 05.06.2018).
7. Ivanov D.A., Karaseva O.V., Rublyuk M.V. Study of the influence of soil cover and relief on crop productivity // Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2021. Vol. 35. P. 19–26. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10203.
8. Moiseev K. G. Fractals: analysis of time series in agrophysics // Collection of reports of the meetings of St. Petersburg branch of V. V. Dokuchaev Society of Soil Scientists “International Year of Soils”. St. Petersburg: “ВВМ ООО” (Limited Liability Company). 2015. P. 3–13.
9. Vadyunina A. F., Korchagina Z. A. Methods for studying the physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 486 p.
10. Bird N., Perrier E., Rieu M. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions // European Journal of Soil Science. 2000. No. 51. P. 55–63. DOI: 10.1046/j.1365-2389.2000.00278.x.
11. Moiseev K. G., Terleev V.V. Modeling of capillary-porous medium structure and calculation of differential soil porosity // Agrophysica. 2017. No. 3. P. 43–56.
12. Moiseev K.G., Terleev V.V. Method for experimental determination fractal dimensions of the soils porous space // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, devoted to the 50th anniversary of All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control “Innovative-Technological Principles of the Development of Adaptive Landscape Agriculture”. Kursk: Kursk Federal Agricultural Research Center, 2020. P. 283–288.

UDC 631.43.+621.981

Moiseev K. G., Terleev V. V.

APPLICATION OF FRACTAL SIMULATION IN SOIL HYDROPHYSICS

Summary. Soil water retention capacity (WRC) is the most important hydrophysical property of soils. The Richards equation is used to calculate soil moisture dynamics in unsaturated zone. This partial differential equation of parabolic type does not have an analytical solution, since the coefficients of this equation, which describe the hydrophysical properties of the soil, are variable. Therefore, the construction of models that describe these soil properties remains relevant at the present time. The aim of this study was to apply the fractal model (Pore – Solid – Fractal (PSF)) to the calculation of the soil moisture matrix potential. Soils of Menkovo land use (Leningrad region) were chosen as objects of the study. Samples of agro-soddy-podzols, agro-soddy-podzolic typical and agro-soddy-podzolic gleyic soils were taken (Podzols, Albic Retisols & Stagnic Retisols (WRB; FAO, 2015)). The experimental values of WRC were measured on the Richards press apparatus. The fractal dimension D of the capillary-porous medium – soil was calculated using experimental data on the total porosity of soils and the size distribution of soil aggregates and elementary soil particles. All experimental studies were carried out on the basis of standard methods and state standards. The calculated pressure values were obtained using a modified PSF-M model. To compare the experimental and model retention curves, non-parametric statistics, namely Mann-Whitney U test, was used. The calculated values of the criterion ranged from 7 to 11, depending on the confidence level (0.95–0.99), which is significantly less than the critical values of the criterion, which are equal to an average of 18–23. The PSF-M fractal model describes the experimental curves with a high degree of convergence. Mann-Whitney statistics do not show the statistical significance of their differences. The use of the PSF fractal model for modeling the hydrophysical properties of soils has broad perspectives.

Keywords: hydrophysical properties, fractals, soil moisture pressure, water retention capacity.

Моисеев Кирилл Геннадьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела Биофизики почв Агрофизического научно-исследовательского института. Врио заведующего лабораторией Физики и физической химии почв, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: kir_moiseev@mail.ru.

Терлеев Виталий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: Vitaly_Terlev@mail.ru.

Moiseev Kirill Gennadievich, Cand. Sc. (Agr.) leading researcher, Department of soil biophysics; temporary acting head of the Laboratory of physics and physical chemistry of soils, Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrophysical Research Institute” (FSBSI ARI); 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: kir_moiseev@mail.ru .

Terleev Vitaly Viktorovich, Dr. Sc. (Agr.), senior researcher, Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction of the Engineering and Construction Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University” (SPbPU); 29, Politekhnicheskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia; email: Vitaly_Terlev@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 11.05.2022.

Дата принятия к печати – 19.07.2022.