

РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТИ НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЧВЫ

Показана возможность расчета дифференциальной пористости агро-темно-серой почвы со вторым гумусовым горизонтом по данным гранулометрического состава, плотности и содержания органического вещества с использованием комплекса регрессионных моделей.

ВВЕДЕНИЕ

В современном почвоведении широко используются эмпирические модели для расчета характеристики водоудерживания почвы по свойствам твердой фазы почвы [3, 4, 7, 8, 9]. Эти свойства обычно включают: гранулометрический состав, содержание органического углерода, плотность или пористость почвы. Использование таких моделей привело к накоплению обширной информации об основных физических свойствах почв в различных странах мира [1, 3, 7]. Открылся доступ к международным базам данных. Дифференциальная пористость (ДП) почвы относительно мало была востребована до появления математических и статистических методов, позволяющих моделировать структуру порового пространства (ПП) и процессы массопереноса в пористых средах. В настоящее время эти методы используются все шире в исследованиях, связанных с переносом бактерий и коллоидов. Отсутствие надежных и недорогих методов измерения ДП почвы явилось стимулом для настоящего исследования. Задачей исследования явилась проверка возможности расчета ДП из свойств твердой фазы почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом изучения были пахотный (Ap), второй гумусовый (Ah) и переходный (Eв) горизонты агро-темно-серой лесной почвы Владимирского ополья. Измерения гранулометрического состава (ГС), плотности и содержания органического углерода (ОС) в почвенных горизонтах проводили по стандартным методикам [2, 3] в трехкратной повторности. Результаты показали, что в ГС исследованных горизонтов преобладает фракция крупной пыли (рис. 1а). Ее содержание в горизонтах составляет 51-42%, и незначительно убывает с глубиной. Содержание песчаной фракции незначительно, и увеличивается с глубиной от 6% в Ap до 20% в Ah и Eв горизонтах. Все почвенные горизонты по классификации FAO относятся к пылеватым суглинкам, и к глине легкой по классификации Н.А. Качинского.

Содержание ОС и значения плотности почвы различались в почвенных горизонтах. Наименьшие значения плотности были получены в горизонте Ah, наибольшие в минеральном горизонте Eв (рис. 1б). Обратное наблюдалось для значений ОС. Содержание ОС было максимальным в Ah и минимальным в Eв горизонте (рис. 1в).

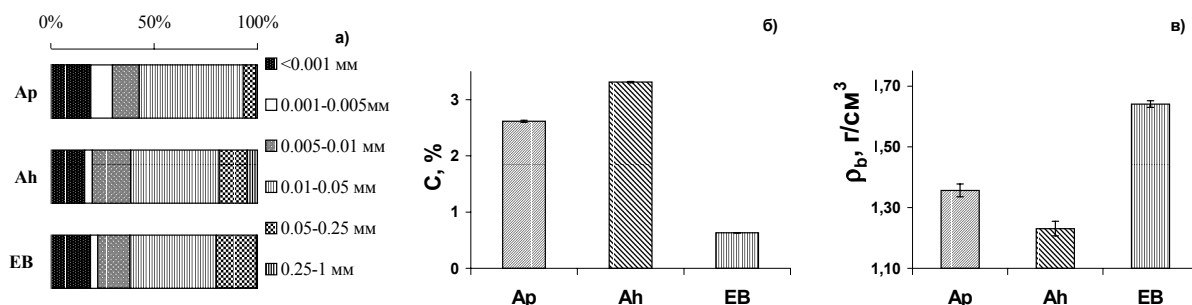


Рисунок 1. Гранулометрический состав (а), содержание органического углерода (б) и плотность почвенных горизонтов (в)

Таблица 1. Классы пор по размерам и гидрофизическим функциям

по Brewer (1964)			по Воронину (1980)	
класс пор	d пор, мкм	давление влаги	класс пор	давление влаги
кристопоры	<0.1	pF>4.48	прочносвязанная вода*	pF>5.2+3W
ультрамикропоры	0.1-5	2.78<pF<4.48	вагосохраняющие	2.17+3W<pF<5.2+3W
микропоры	5-30	2.0<pF<2.78	вагопроводящие	pF<2.17+3W
мезопоры	30-75	1.6<pF<2.0	аэрации	pF<2.17+W
макропоры	>75	pF<1.6	инfiltrации	pF<2.17

* прочносвязанная вода не является капиллярной и, формально, не характеризует класс пор. Эта категория была добавлена для сопоставления расчетных методов оценки категорий почвенной влаги по свойствам твердой фазы почвы.

Таблица 2. Список моделей и параметров, использованных для расчета ОГХ по основным физическим свойствам почвы

№	Модели**		Автор	Входные параметры*			
				ГС	ρ_s	ОС	
1	Регрессионные модели	Коэффициенты аппроксимации ОГХ	Rawls and Brakensiek (1985)	1	+	-	
2			Vereecken et al. (1989)	1	+	+	
3			Saxton et al. (1986)	1	+	-	
4			Д. Варалля и др. (1982)	1	+	-	
5			Williams-1 (1992)	1	+	+	
6			Williams-2 (1992)	1	+	+	
7			Campbell and Shiozawa (1992)	1	+	-	
8			Oosterveld and Chang (1980)	1	+	-	
9			Wosten et al.-1 (1999)	1	-	-	
10			Wosten, et al.-2 (1999)	1	+	+	
11			Mayr and Jarvis (1999)	1	+	+	
12			Пары значений (? , P)	Rawls et al. (1982)	1	+	+
13				Tomasella and Hodnett (1998)	1	-	+
14				Rawls et al. (1983)	1	+	+
15				Шейн и др. (2000)	2	+	-
16	Нейросеть (ROSETTA)	Schaap et al. (2001)	3	-	-		
17		Schaap et al. (2001)	1	-	-		
18		Schaap et al. (2001)	1	+	-		
19	Фрактальные модели	Bird et al. (2000)	1	+	-		
20		Vaz et al. (2005)	1	+	-		

*ГС – гранулометрический состав по классификации USDA (1), по классификации Качинского (2) или текстурный класс почвы по классификации USDA (3); ρ_s – плотность почвы; ОС – содержание органического углерода.

** Ссылки и детальное описание моделей опубликованы в Guber et al., 2006 [7]

Зависимость влажности почвы от давления влаги (ОГХ) измеряли в образцах ненарушенного сложения объемом 125 см³ методом радиальных капилляриметров в капиллярном диапазоне давлений влаги и методом гигроскопического равновесия при значениях pF 4.4, 5.3, 6.2 и 6.4 [1, 3]. Максимальные значения влажности почвы были получены в горизонте Ah, минимальные в горизонте EB при одних и тех же значениях pF (рис. 2). Различия в значениях влажности почвы между горизонтами уменьшались с увеличением величины pF. Относительно высокая вариабельность ОГХ была отмечена в горизонте Ap по сравнению с горизонтами Ah и EB.

Для характеристики ДП почвы нами использованы две классификации: классификация Brewer [5] по размерам пор и классификация Воронина [2] по гидрофизическим функциям пор. Классы пор и соответствующие им значения pF приведены в Таблице 1.

Значения ДП почвы для двух классификаций были рассчитаны из измеренных ОГХ и по данным ГС, ОС и плотности почвы. Для расчетов использовались:

1. Регрессионные модели, основанные на использовании регрессионной зависимости между влажностью почвы θ_i при заданных значениях давления влаги P_i и количественным содержанием фракций ГС, ОС и плот-

ности почвы (модели №1-11, Таблица 2). К этой группе методов также относятся регрессионные зависимости, связывающие параметры аппроксимации ОГХ формулой Brooks and Corey [7] или van Genuchten [7] с перечисленными выше почвенными свойствами (модели №12-16).

2. Нейронные сети – математические модели, основанные на методах распознавания образов или дискриминантного анализа, и представляющие собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов), посредством которых осуществляется преобразование входных данных в выходные (модели №17-19). Нами использовалась программа ROSETTA [8].

3. Фрактальные модели, основанные на самоповторении структуры системы на разных уровнях ее организации (модели №20-21) [6].

Выбор моделей был обусловлен как концептуальным различием в описании взаимосвязи ОГХ и физических свойств почвы, так и различием в составе параметров самих моделей. Результаты расчетов ДП по моделям №1-21 сопоставили с данными, полученными из измеренных ОГХ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет дифференциальной пористости по Brewer из ОГХ показал, что во всех гори-

зонтах наибольшая доля ПП приходится на ультрамикropоры (Рис. 3а). Наименьшая доля ПП ассоциирована с мезопорами в горизонтах Ap и EB, и с крипто-, мезо- и макропорами в горизонте Ah. Доля пор в ПП уменьшалась во всех горизонтах в порядке ультрамикropоры > микropоры > мезопоры. Доля макропор была несколько выше доли мезопор в ПП всех горизонтов (0.06-0.12). Аналогичный расчет по Воронину показал, что наибольшая доля ПП приходится на влагопроводящие поры, наименьшую долю составляет прочно связанная вода во всех горизонтах (Рис. 3б). Доли ПП пространства уменьшаются во всех горизонтах в порядке влагопроводящие поры > поры

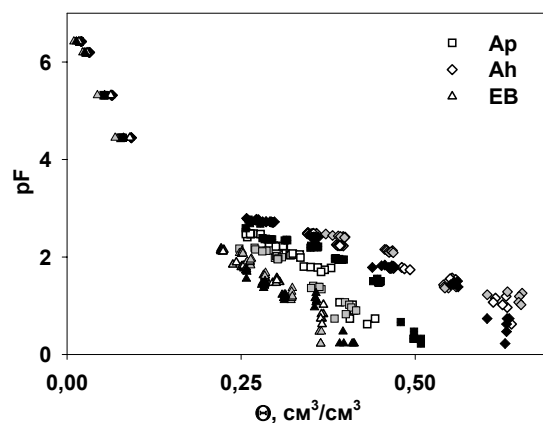


Рисунок 2. Характеристика водоудерживания почвы (ОГХ)

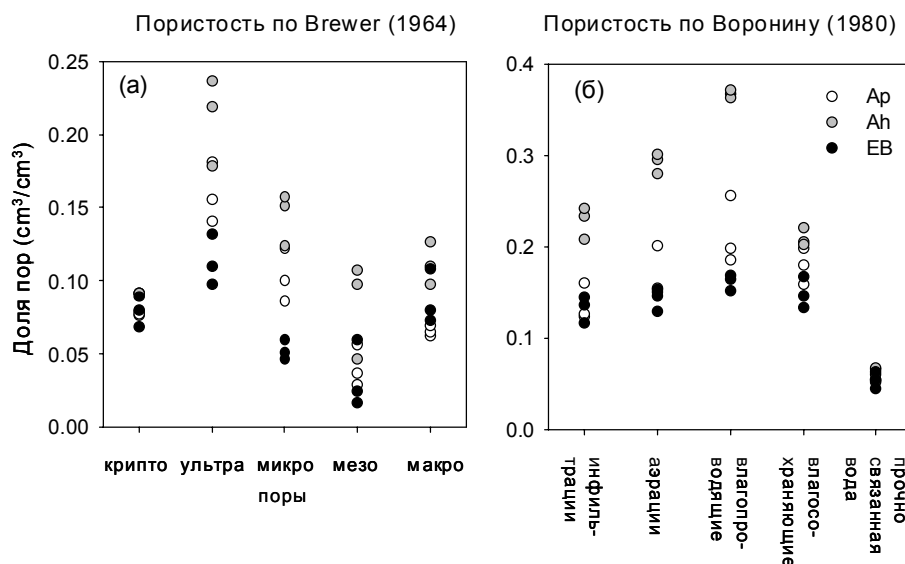


Рисунок 3. Дифференциальная пористость горизонтов, рассчитанная из измеренных ОГХ агро-темно-серой почвы с ВГГ

Таблица 3. Состав параметров и номера моделей (№) из Таблицы 1 с адекватным описанием долевого содержания разных классов пор, полученных из измеренных ОГХ классификации Brewer (1964)

Класс пор	Ар		Аh		ЕВ	
	№	параметры	№	параметры	№	параметры
криптопоры	-	-	-	-	4 17 18	ГC1,ρ _s ГC1 ГC1,ρ _s
ультрамикропоры	14 15 20	ГC1,ρ _s ,OC ГC2,ρ _s ГC1,ρ _s	13	ГC1,OC	19	ГC1,ρ _s
микропоры	11 14 16 17 18	ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ,OC ГC3 ГC1 ГC1,ρ _s	21 13 15 19	ГC1,ρ _s , OC ГC1,OC ГC2,ρ _s ГC1,ρ _s	-	-
мезопоры	1 4 5 10 11	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ,OC	3 5 7 11 13 16 17 18 19	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s , OC ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC1,OC ГC3 ГC1 ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s	4 6 7 8 9 10 11 15 20	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ГC1 ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ,OC ГC2,ρ _s ГC2,ρ _s
макропоры	13	ГC1,OC	12 13 19	ГC1,ρ _s ,OC ГC1,OC ГC1,ρ _s	4 15 19	ГC1,ρ _s ГC2,ρ _s ГC1,ρ _s

Таблица 4. Состав параметров и номера (№) моделей из Таблицы 1 с адекватным описанием долевого содержания разных классов пор, полученных из измеренных ОГХ классификации Воронина (1980)

Класс пор	Ар		Аh		ЕВ	
	№	параметры	№	параметры	№	параметры
прочносвязанная вода	11	ГC1,ρ _s ,OC	-	-	-	-
влагосохраняющие	1 5 7 9 10 20	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s ГC1 ГC1,ρ _s ,OC ГC2,ρ _s	2	ГC1,ρ _s ,OC	1 6 19	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC1,ρ _s
влагопроводящие	1 3 4 5 20	ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ГC1,ρ _s ,OC ГC2,ρ _s	4	ГC1,ρ _s	10 20	ГC1,ρ _s ,OC ГC2,ρ _s
аэрации	4	ГC1,ρ _s	8	ГC1,ρ _s	5 9	ГC1,ρ _s ,OC ГC1
инфильтрации	-	-	19	ГC1,ρ _s	-	-

аэрации > поры инфильтрации, однако это уменьшение не одинаково на разных горизонтах. Наибольшие различия между этими группами пор проявляются в горизонте Аh, наименьшие – в горизонте ЕВ.

Расчитанные из ОГХ значения ДП для двух классификаций сравнили с данными расчетов по моделям №1-21. Сравнение по-

казало, что ни одна из моделей не описывает адекватно ДП для всех классов пор, однако описание отдельных классов пор с использованием разных моделей было удовлетворительным. На рис. 4 сопоставлены значения ДП рассчитанные из измеренных ОГХ с полученными расчетом по лучшей для данного класса пор модели. Оценка различий по

критерию Фишера на 0.05 уровне значимости не выявила различий между двумя расчетами ДП почвы. Это означает, что использование комплекса моделей вместо единственной (даже лучшей) модели способно привести к адекватному описанию ДП по данным о твердой фазе почвы.

Результаты анализа состава моделей и параметров для трех горизонтов и двух классификаций ПП приведены в Таблицах 3 и 4. Модель считали адекватной для данного класса, если рассчитанная по ней величина пористости лежала в диапазоне варьирования значений пористости для этого класса пор, рассчитанных из измеренной ОГХ почвы.

Минимальное количество моделей необходимых для описания 4 классов пор по классификации Brewer оказалось равным трем в горизонте Ap, и двум в горизонтах Ap и EВ (табл. 3). Состав моделей оказался разным для разных горизонтов. Только три (№ 5, 11, 13) модели из горизонта Ap перешли в состав моделей для горизонта Ah, и три модели (№ 7, 11, 19) перешли из Ah в EВ горизонт.

Анализ данных, необходимых для описания ДП минимальным числом моделей показал, что в горизонте Ap необходимо измерять ГС, плотность и ОС; в горизонте Ah достаточно измерения ГС и ОС; в горизонте EВ – ГС и плотности почвы (табл. 3). Различия в составе данных для моделей, повиди-

мому, объясняются различиями в свойствах почвенных горизонтов.

Различия в составе моделей для расчета ДП для разных горизонтов, вероятно, объясняются исходной информацией, использованной для их построения и сходством физических свойств со свойствами горизонтов, представленными в настоящей работе.

Количество моделей, адекватно описывающих ДП, по классификации Воронина в горизонте Ah было маленьким: по одной модели для каждого класса пор, и несколько большим (2-3) в горизонте EВ (табл. 4). Следует отметить, что модели для разных классов пор были разными в этих горизонтах, но все попадали в группу регрессионных или фрактальных моделей. В горизонте Ap также были представлены модели только из этих двух групп, однако их количество для влагопроводящих и влагосохраняющих пор было существенно больше. Лучшее воспроизведение моделями ДП в горизонте Ap объясняется, скорее, не качеством самих моделей, а большей вариабельностью измеренных значений пористости для этих классов пор по сравнению с вариабельностью в горизонтах Ah и EВ (рис. 3б).

Анализ числа моделей и их параметров, необходимых для описания ДП по классификации Воронина, показал, что на основе данных ГС и плотности почвы могут быть рассчитаны 3 класса пор в горизонте Ap с использованием 2 регрессионных моделей, 3 класса пор в горизонте EВ с использованием двух

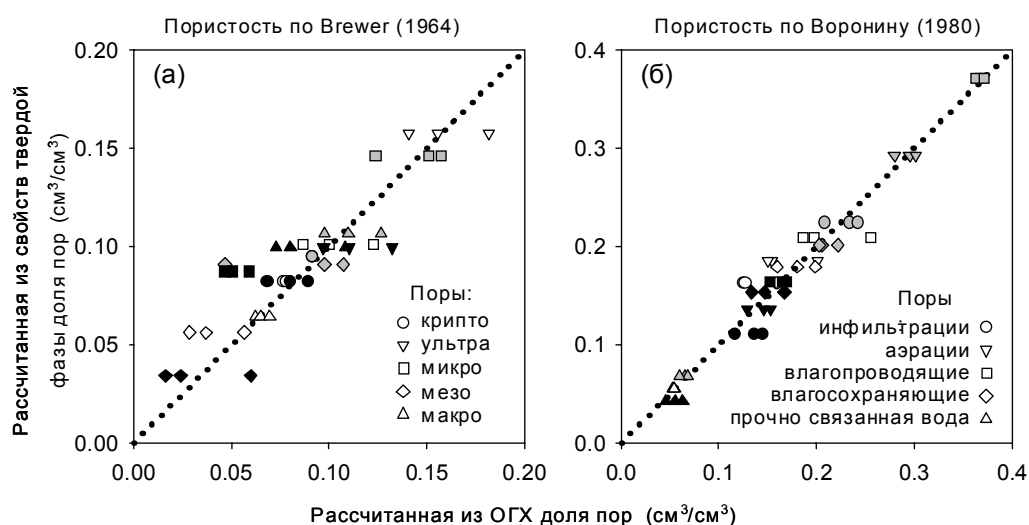


Рисунок 4. Сопоставление значений ДП, рассчитанных из физических свойств твердой фазы почвы и из измеренных ОГХ. Тонем показаны горизонты Ap (белый), Ah (серый) и EВ (черный)

регрессионных и одной фрактальной модели, и 4 класса пор в горизонте Ah с использованием 3 регрессионных и одной фрактальной модели на основе тех же данных и данных ОС. Примечательно, что как и в случае с классификацией Brewer, разные модели попали в список адекватных на разных горизонтах. Минимальный набор моделей для классификации Воронина не совпал с набором моделей для классификации Brewer.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показали перспективность использования регрессионных моделей для расчета ДП почвы. Нам не удалось добиться адекватного описания всех классов пор по классификации Brewer и Воронина с помощью единственной модели.

Однако комплекс моделей адекватно описал величины ДП, рассчитанные из измеренных ОГХ. Состав моделей и данных, используемых в регрессионных моделях был разным для разных горизонтов и классификаций. ДП по Brewer различен в разных горизонтах. В Ap это – гранулометрический состав, плотность почвы и содержание органического углерода; в горизонте Ah – гранулометрический состав и содержания органического углерода; в EB горизонте – гранулометрического состав и плотность почвы. Несомненно, анализ состава моделей и данных о твердой фазе почвы, необходимых для адекватного описания дифференциальной пористости почвы представляется интересным предметом исследования на более обширном материале.

Список использованной литературы:

1. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. Под редакцией Е.В. Шеина, М., МГУ, 2001.
2. Воронин А.Д. 1986. Основы физики почв М., МГУ, 245 с
3. Шеин Е.В. Курс физики почв М.:Изд-во МГУ, 432 с., 2005.
4. Bird, N.R.A., E. Perrier, and M.Rieu. 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *Europ. Jour. of Soil Sci.*, 51: 55-63.
5. Brewer R. 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York: Wiley. 470 p.
6. Guber, A. K., Ya. A. Pachepsky, E. V. Levkovsky. 2004. Mass-Size Scaling in Soil Aggregates as Affected by Aggregate Moisture Content and Soil Compaction. *Soil Sci. of America*, January. 169: 1-12.
7. Guber A.K., Ya. A. Pachepsky,* M. Th. van Genuchten, W. J. Rawls, J. Simunek, D. Jacques, T. J. Nicholson, and R. E. Cady. 2006. Field-Scale Water Flow Simulations Using Ensembles of Pedotransfer Functions for Soil Water Retention. *Soil Science Society of America, Vadose Zone Journal*. 5:234-247.
8. Schaap M.G., Feike J. Leij, M.Th. van Genuchten. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251: 163-176.
9. Vaz C. M. P., M. de F. Iossi, J. de Mendonc. 2005. Validation of the Arya and Paris Water Retention Model for Brazilian Soils. *Soil Sci. of America*, No. 3, April. 69: 557-583.