

ТОМОГРАФИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ

УДК 631.4

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОР В ТЕМНО-СЕРОЙ ПОЧВЕ СО ВТОРЫМ ГУМУСОВЫМ ГОРИЗОНТОМ (ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

© 2021 г. Е. Б. Скворцова^{а, *}, К. Н. Абросимов^а, В. Н. Щепотьев^а, В. Н. Дмитренко^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: eskvora@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Проведено количественное морфологическое исследование пор в темно-серой почве со вторым гумусовым горизонтом (Luvic Retic Greyzem Phaeozem (Loamic) [14]) Каширского района Московской области Российской Федерации. Цель работы заключалась в установлении специфических особенностей пространственной организации почвенных пор в качестве новых диагностических признаков полигенетичных почв со вторым гумусовым горизонтом (ВГГ) на территории Восточно-Европейской равнины. Исследования проводили с использованием лабораторного микротомографа Bruker SkyScan 1172 (Почвенный институт им. В.В. Докучаева). Показано, что для диагностики порово-структурного состояния второго гумусового горизонта уровень мезопор и тонких макропор более информативен, чем уровень грубых макропор. В диапазоне пор $d = 0.03\text{--}2$ мм анализ закрытой томографической пористости выявил двойственную природу ВГГ: по объему закрытых пор в образце он мало отличается от горизонта AU3el, а по доле этих пор в поровом пространстве приближается к горизонту BT1el. Подтверждено диагностическое значение формы почвенных пор. Выявлено, что в толще ВГГ более половины пор $d = 0.1\text{--}2$ мм представлено изометричными изрезанными порами упаковки зернисто-комковатых агрегатов. Благодаря этому среднее арифметическое значение фактора формы F для тонких макропор в этом горизонте достигает величины $F = 0.5$. Отличие ВГГ от современных гумусовых горизонтов по форме тонких макропор можно расценивать как дополнительный аргумент в пользу реликтового происхождения ВГГ.

Ключевые слова: полигенетичные почвы, пористость почвы, форма пор, фактор формы пор, микро-морфометрия пор

DOI: 10.31857/S0032180X21090082

ВВЕДЕНИЕ

Для характеристики порового пространства дисперсных пород и почв используют общие, дифференциальные и индивидуальные объемы пор, а также протяженность границ, линейные размеры, количество, форму, ориентацию пор, их взаимное расположение. Для выявления специфики педогенеза эти показатели не равноценны. Так, значения общей пористости сами по себе не являются специфическими почвенными признаками. Сравнимые с почвами величины общего объема пор наблюдаются во многих полидисперсных геологических породах [7]. Более специфичны для почв профильные изменения общей и дифференциальной пористости, пространственное варьирование этих показателей [1, 4]. Наибольшей педогенной специфичностью обладает морфологическое строение почвенных пор на агрегатном, морфонном и горизонтном уровнях организации почвы. На этих уровнях строение пор отражает

четкие различия между почвой и почвообразующей породой, между различными почвенными горизонтами.

Для изучения морфологического строения межагрегатных и внутриагрегатных почвенных пор используют методы оптической и электронной микроскопии, а также более современный метод компьютерной рентгеновской томографии, позволяющий неинвазивным путем исследовать внутреннее строение почвенных монолитов разного размера [3, 13, 14, 20]. Компьютерная томография является информативным, но до настоящего времени редким и дорогостоящим методом исследования. Поэтому особенно актуально применение этого метода для уникальных почвенных объектов, таких как вторые гумусовые горизонты (ВГГ) в полигенетичных суглинистых почвах Восточно-Европейской равнины. Известно, что эти горизонты отличаются от поверхностных гумусово-аккумулятивных аналогов по характеру мик-

ростроения, в том числе по объемам и форме почвенных пор [8]. Однако следует отметить, что опубликованные данные получены методами качественного или полуколичественного анализа. Детальные морфометрические исследования порового пространства вторых гумусовых горизонтов ранее не проводились. Актуальность подобных исследований обусловлена не только генетическими задачами, но также установленной связью между томографическими показателями почвенных пор и биологической активностью почвы [16, 18], параметрами гидравлической проводимости, коэффициентами диффузии грунт–газ и проницаемостью грунт–воздух [11], тепловыми параметрами среды [17] и др. Таким образом, томографический анализ открывает новые перспективы в диагностике и функциональной характеристике почв со вторым гумусовым горизонтом.

Цель работы заключалась в установлении специфических особенностей пространственной организации почвенных пор в качестве новых диагностических признаков полигенетичных почв со вторым гумусовым горизонтом на территории Восточно-Европейской равнины. В представленной статье на качественном и количественном уровне исследованы объемы и форма почвенных макро- и мезопор в основных генетических горизонтах темно-серой почвы со вторым гумусовым горизонтом [6] (Luvic Retic Greyzemic Phaeozem (Loamic) по классификации WRB [14]).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на юго-западе Каширского района Московской области. Территория характеризуется средней лесистостью (от 15 до 20%) и, согласно лесорастительному районированию, относится к зоне хвойно-широколиственных лесов [5]. Разрез заложен в обширной западине под пологом широколистного леса. Координаты разреза: 54°46'37.52" N, 38°01'55.34" E.

Исследованная почва является типичным представителем почвенного покрова в западных формах рельефа юга Восточно-Европейской равнины. Почвенный профиль имеет следующее строение: AU, 0–40 см (подразделяется на слои: AU1 0–15 см, AU2 15–30 см, AU3el 30–40 см); AUel, hh 30(40)–55(60) см; BT1el 55(60)–85 см, BT2 85–110 см; BT3 110–140 см; BC > 140 см (индексация горизонтов по классификации и диагностике почв России [6]).

Современный гумусовый гор. AU среднесуглинистый, темноокрашенный, перерыв почвенной фауной, дифференцирован по окраске, плотности и структуре. На глубине 0–15 см окраска темно-серая, структура комковато-зернистая с выраженной горизонтальной плитчатостью, сложение рыхлое. На глубине 15–30 см в окраске по-

является буроватый оттенок, структура комковато-порошистая, есть отдельные уплотненные участки. На глубине 30–40 см заметны белесые скелетаны, структура комковато-порошистая, местами неясно-плитчатая, сложение плотноватое. Второй гумусовый горизонт AUel, hh тяжелосуглинистый, окраска темнее предыдущего, неравномерная с бурыми и белесыми пятнами, плотный, пористый, структура зернисто-комковатая, местами неясно-плитчатая, многопорядковая. По граням структурных отдельностей темные гумусовые кутаны и белесые скелетаны; нижняя граница языковатая. Горизонт BT1el плотный, бурый с серыми глинисто-гумусовыми кутанами и редкими белесоватыми скелетанами, структура крупнореховато-призматическая, многопорядковая, призмы имеют вертикальную ориентацию. Горизонт BT2 более увлажнен, тяжелосуглинистый до глинистого, бурый с серыми гумусовыми потеками, структура глыбисто-призматическая, вязкий, плотный. BT3 тяжелосуглинистый до глинистого, бурый с темными гумусовыми потеками по ходам корней или морозобойным трещинам, встречаются ортштейны и марганцевые примазки, плотный, структура неясно-глыбистая. Гор. BC — темно-бурый, тяжелый лёссовидный суглинок.

Анализ мезо- и тонкого макропорового пространства проводили в цилиндрических почвенных микромонолитах $d = 3$ см и $h = 4$ см, отобранных из срединных частей генетических горизонтов. Для изучения более грубых макропор отбирали профильный цилиндрический макромонолит диаметром в 10 см и высотой 100 см, охватывающий почву от поверхности до горизонта BT2.

Исследование микромонолитов проводили на микротомографе Bruker SkyScan 1172 (Почвенный институт им. В.В. Докучаева) с разрешением 16 мкм/пиксель, что допускает анализ мезо- и тонких макропор $d = 0.03$ –2 мм. Для изучения макромонолита использовали лабораторный микротомограф геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Монолит сканировали с разрешением 100 мкм/пиксель, что позволяет исследовать строение макропор $d > 2.0$ мм в верхней метровой толще почвы.

При обработке результатов томографического сканирования использовали программное обеспечение SkyScan и Image-Pro [12]. В микромонолитах определяли величины общей томографической пористости (суммарный объем пор, доступных анализу в соответствии с принятым разрешением сканирования), открытую пористость и закрытую пористость. Открытую пористость определяли как суммарный объем пор, пересекающих границы виртуального анализируемого цилиндра, а закрытую — как суммарный объем пор, не выходящих за пределы этого ци-

Таблица 1. Гранулометрический состав темно-серой почвы с ВГГ (по Н.А. Качинскому)

Горизонт	Глубина, см	Гигроскопическая влага, %	Содержание фракции, % (размер частиц, мм)							
			1.0–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01	сумма частиц >0.01
AU1	0–15	2.34	0.80	9.75	55.02	12.08	13.63	8.72	34.43	65.57
AU2	15–30	1.99	0.61	9.79	55.86	11.79	15.42	6.53	33.74	66.26
AUel,hh	40–60	2.07	0.08	6.85	47.90	11.89	16.0	17.28	45.17	54.83
BT1el	60–85	3.30	0.10	5.32	43.14	10.16	12.81	28.47	51.44	48.56
BT2	85–110	3.21	0.03	5.73	43.92	9.45	10.74	30.13	50.32	49.68
BT3	110–140	3.63	0.05	5.30	40.24	9.36	15.01	30.04	54.41	45.59

линдра. На основании величин общей и закрытой томографической пористости рассчитывали величины относительной закрытой пористости (% от общей томографической пористости). Кроме того, в вертикальных двумерных срезах через компьютерные реконструкции микромонологитов определяли морфометрические показатели формы тонких макропор $d = 0.1–2$ мм, отличающихся большим разнообразием морфологического строения. В качестве показателя формы пор использовали фактор формы $F = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$, где S – площадь, P – периметр, D – поперечный габарит, L – продольный габарит пор в двумерных срезах [9, 19].

Исследование почвы в макромонологите проводили на качественном уровне. В дополнение к томографическим анализам в почве определяли общее содержание гумуса по методу Тюрина и базовые физические показатели (табл. 1 и 2). Для характеристики гранулометрического состава почвы использовали седиментационный пипеточный метод по Качинскому. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом, плотность почвы ненарушенного сложения – буровым методом в модификации Качинского с объемом буриков 100 см^3 . Сопротивление пенетрации определяли микропенетрометром МВ-2 с углом при вершине конуса (плунжера) 30° . Общую пористость рассчитывали по соотношению плотности сложения и плотности твердой фазы почвы, определенной пикнометрически. Полную влагоемкость определяли лабораторным методом насыщения монолитов. Повторность всех определений 10-кратная. Для физических показателей рассчитывали средние арифметические значения, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Результаты морфометрического анализа пор обрабатывали методами многомерной статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследованной почвы в целом характерен элювиально-иллювиальный тип профильного распределения илистой фракции (табл. 1), боль-

шое содержание гумуса в подгоризонтах AU1, AU2 и AU3el (соответственно 6.36, 3.83 и 2.55%) и резкое уменьшение степени гумусированности в горизонтах, залегающих под ВГГ.

Второй гумусовый горизонт по общему содержанию гумуса (2.88%) близок к нижней части современного гор. AU. При этом по литературным данным количество бактерий и архей в данном ВГГ резко понижено и мало отличается от мало-гумусовых горизонтов BT, а содержание микромицетов, напротив, повышено и превышает показатели всех остальных горизонтов [2]. Сложное сочетание химических и бактериологических показателей ВГГ в дополнение к проблематичному генезису указывает на неоднозначность его современных функций.

По содержанию илистой фракции, плотности почвы, общей пористости ВГГ занимает промежуточное положение в профиле, причем верхняя его часть (40–50 см) по физическим свойствам тяготеет к гумусовому горизонту AU3el, нижняя часть (50–60 см) – к текстурному горизонту BT1el (табл. 2). Вертикальная дифференциация ВГГ (гор. AUel,hh) выражена не только по значениям физических показателей, но также по их горизонтальной пространственной изменчивости. Так, в верхней части ВГГ коэффициенты вариации всех показателей (кроме влажности и сопротивления пенетрации) в 1.5–1.8 раза меньше, чем в его нижней части. С учетом пониженного варьирования физических свойств отбор почвенных микромонологитов для томографического анализа ВГГ проводили на глубине 45–50 см.

Макротомографический анализ грубых макропор $d > 2$ мм выявил в профиле темно-серой почвы наличие крупных биогенных полостей (рис. 1). В горизонтах AU1 и AU2 эти полости встречаются часто, представлены ходами мелких почвенных позвоночных, имеют вытянутую форму и горизонтальную ориентацию. Ниже по профилю крупные полости присутствуют в меньшем количестве и обычно вытянуты в вертикальном

Таблица 2. Физические свойства темно-серой почвы со вторым гумусовым горизонтом ($n = 10$)

Горизонт, глубина, см	Статистики	Плотность, г/см ³	Влажность при определе- нии плотности, % от массы	Сопротивление пенетрации, кПа	Общая пористость	Полная влагоемкость
					%	
AU, 0–10	<i>M</i>	0.92	36.46	67.50	64.56	70.96
	<i>s</i>	0.10	4.27	17.10	4.00	11.00
	<i>V, %</i>	10.9	11.70	25.3	6.2	15.5
AU, 10–20	<i>M</i>	0.94	32.63	87.41	64.00	68.46
	<i>s</i>	0.03	3.20	29.26	1.13	3.27
	<i>V, %</i>	3.2	9.8	33.5	1.8	4.8
AU, 20–30	<i>M</i>	1.00	25.8	97.40	62.25	62.43
	<i>s</i>	0.05	1.7	22.97	1.80	4.90
	<i>V, %</i>	5.0	6.6	23.6	2.9	7.9
AUel, 30–40	<i>M</i>	1.10	22.2	128.90	58.35	53.14
	<i>s</i>	0.07	1.5	23.58	2.60	5.41
	<i>V, %</i>	6.4	6.8	18.3	4.5	10.2
AUel,hh, 40–50	<i>M</i>	1.23	19.5	198.44	54.46	44.37
	<i>s</i>	0.04	1.1	68.56	1.54	2.74
	<i>V, %</i>	3.2	5.6	34.6	2.8	6.2
AUel,hh, 50–60	<i>M</i>	1.37	18.3	311.96	49.24	36.07
	<i>s</i>	0.07	0.9	58.88	2.00	4.00
	<i>V, %</i>	5.1	4.9	18.9	4.1	11.1
BT1el, 70–80	<i>M</i>	1.50	20.6	379.46	45.63	30.56
	<i>s</i>	0.04	0.4	46.21	2.00	2.00
	<i>V, %</i>	2.7	1.9	12.2	4.4	6.5
BT2, 100–110	<i>M</i>	1.52	22.9	297.70	44.76	29.50
	<i>s</i>	0.04	0.2	56.00	1.00	2.00
	<i>V, %</i>	2.6	0.9	18.8	2.2	6.8
BC, 140–150	<i>M</i>	1.51	26.59	168.89	45.14	29.94
	<i>s</i>	0.02	0.4	54.31	1	1
	<i>V, %</i>	1.3	1.5	32.2	2.2	3.3

Примечание. *M* – средние арифметические значения показателя; *s* – стандартное отклонение; *V, %* – коэффициент вариации.

направлении. ВВГ по свойствам грубых макропор занимает промежуточное положение между верхними и нижними горизонтами и не отличается выраженной специфичностью.

Микротомографический анализ более детально раскрывает особенности порового пространства исследованной почвы. По полученным данным общая томографическая пористость (для исследованных пор $d = 0.03–2$ мм) и расчетная физическая пористость почвы имеют сходные профильные распределения (рис. 2.1 и 2.2). Однако на всех исследованных глубинах и во всех гене-

тических горизонтах физические значения общей пористости превышают томографические данные в 2–5 раз и более. Эти различия обусловлены тем, что принятое разрешение томографического сканирования исключает из анализа тонкие микро- и субмикропоры. Влияние лимита разрешений сильнее сказывается в нижних горизонтах с массивной структурой почвы и менее выражено в верхних агрегированных горизонтах.

Размерное ограничение томографического исследования не снижает его диагностической значимости. Многие томографические показатели ин-

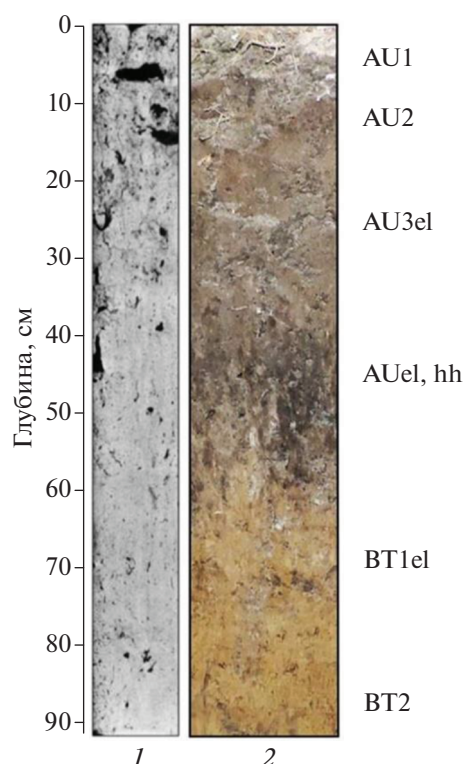


Рис. 1. Томографическое 2D изображение грубых макропор $d > 2$ мм (1, поры черные) и фотоизображение профиля темно-серой почвы со вторым гумусовым горизонтом (2).

формативны для оценки сберегающей и проводящей функций почв. Это различные виды объемной томографической пористости: общая, открытая, закрытая. Другие томографические показатели позволяет количественно характеризовать габари-

ты, форму, ориентацию и прочие морфолого-геометрические показатели почвенной пористости и структуры.

Среди объемных томографических показателей большой интерес представляет величина закрытой пористости. Как указано в методах исследования, под закрытой томографической пористостью понимают суммарный объем пор, расположенных внутри виртуального анализируемого объема и не выходящих за его пределы. Другими словами, закрытые поры полностью заключены внутри анализируемого объема, они не имеют контакта с внешними порами и, в силу этого, их проводящие функции сильно ограничены.

На рис. 2 (кривые 3 и 4) показаны профильные изменения величин открытой и закрытой томографической пористости, выраженные в процентах от анализируемого объема образца. Различия в характере кривых обусловлены тем, что в верхних хорошо агрегированных горизонтах преобладают сильно разветвленные межагрегатные томографически открытые поры, тогда как в нижних горизонтах массово встречаются изолированные томографически закрытые полости.

Поскольку в почвах с хорошо выраженной агрегатной структурой доля закрытой пористости в общем объеме анализируемого образца обычно невелика, имеет смысл оценивать закрытую пористость в процентах от объема общей томографической пористости (рис. 2, кривая 5). При переходе к относительным значениям закрытой томографической пористости характер профильного изменения показателя в целом не изменяется, однако размах значений может увеличиться более чем в 5 раз, что имеет дополнительное диагностиче-

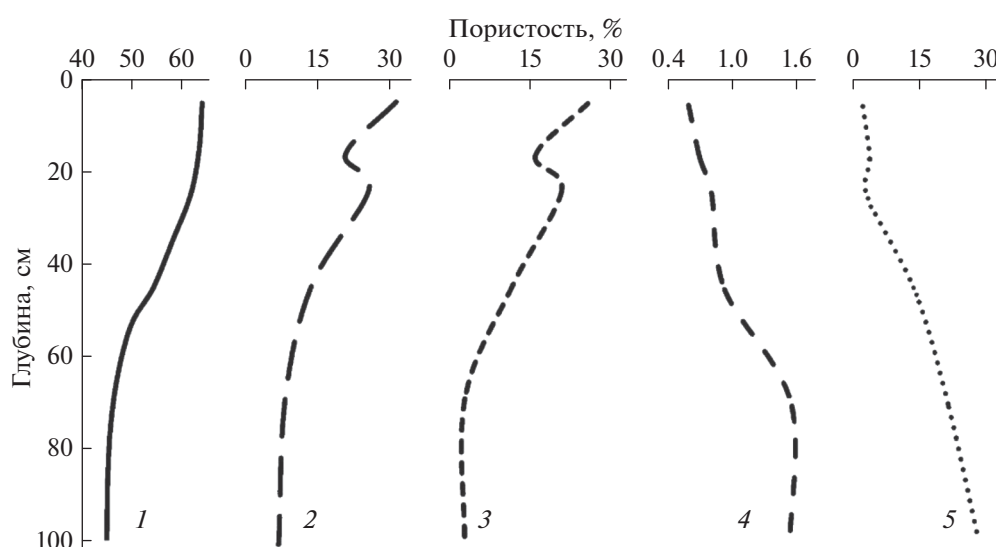


Рис. 2. Профильные изменения расчетной объемной пористости (1) и различных категорий томографической пористости: общей (2), открытой (3), закрытой (4), закрытой в процентах от общей пористости (5) в темно-серой почве с ВГГ. Сканирование на микротомографе SkyScan 1172, габариты образца 3×4 см, разрешение сканирования 16 мкм/пиксель.

Таблица 3. Распределение доли (%) тонких макропор $d = 0.1\text{--}2$ мм по фактору формы F в двумерных срезах через томографические реконструкции микромонолитов $d = 3$ см и $h = 4$ см в горизонтах

Горизонт, глубина отбора образца, см	Содержание пор с фактором формы F				
	$0 < F \leq 0.2$	$0.2 < F \leq 0.4$	$0.4 < F \leq 0.6$	$0.6 < F \leq 0.8$	$0.8 < F \leq 1.0$
AU1, 5–10	7.6	49.2	35.6	7.6	0
AU2, 15–20	0.9	38.9	45.4	13.9	0.9
AU3el, 30–35	2.3	42.8	39.1	14.3	1.5
AUel,hh, 44–49	2.4	21.9	52.3	21.1	2.3
BT1el, 70–75	8.2	49.3	27.4	15.1	0
BT2, 100–105	11.1	55.6	25.0	8.3	0

ское значение. Так, сопряженный анализ закрытой томографической пористости по отношению к образцу и по отношению к объему общей пористости показал двойственную природу второго гумусового горизонта: по величине абсолютной закрытой пористости ВГГ мало отличается от горизонта AU3el (рис. 2, кривая 4), а по величине относительной закрытой пористости он заметно приближается к гор. BT1el (рис. 2, кривая 5). В этом проявляется специфическое для исследованного ВГГ сочетание многопорядковой агрегированности и сравнительно уплотненного сложения (физическая плотность ВГГ в 1.1–1.2 раза больше, чем в горизонте AU3el (табл. 2)). Первое обуславливает малые абсолютные значения закрытой пористости, а второе – ее повышенные относительные значения.

В наибольшей степени специфика ВГГ проявляется при анализе формы тонких макропор $d = 0.1\text{--}2$ мм. Визуальный анализ микрофотографических реконструкций монолитов $d = 3$ см, $h = 4$ см показал, что в современном гумусовом горизонте присутствует множество вытянутых изрезанных пор упаковки плитчатых и комковато-блоковых агрегатов, а также их агломератов (рис. 3, А, 1–3). В горизонте ВГГ широко распространены более изометричные разветвленные поры упаковки зернисто-комковатых агрегатов (рис. 3, А, 4). В горизонтах ВТ почвенная масса уплотнена, в поровом пространстве преобладают поры с округлыми и вытянутыми трещиновидными срезами (рис. 3, А, 5 и 6). Аналогичную качественную информацию можно получить по двумерным срезам через микрофотографические монолиты (рис. 3, Б).

Качественные данные подтверждаются количественными показателями, полученными при компьютерном морфометрическом анализе тонких макропор пор $d = 0.1\text{--}2$ мм в двумерных срезах. В качестве показателя формы пор использовали фактор формы F . В опубликованных ранее работах показано, что для характеристики и диагностики строения порового пространства почвы в двумерных срезах достаточно эмпирических распределений пор по пяти классам фактора фор-

мы F : $0 < F \leq 0.2$ (поры трещиновидной формы); $0.2 < F \leq 0.4$ (поры вытянутой изрезанной формы); $0.4 < F \leq 0.6$ (поры изометричной изрезанной формы); $0.6 < F \leq 0.8$ (поры изометричной слабо-изрезанной формы); $0.8 < F \leq 1.0$ (поры округлой формы) [9, 19].

В исследованной почве эмпирические распределения пор $d = 0.1\text{--}2$ мм по пяти классам фактора формы отражают выявленные на качественном уровне особенности порового пространства (табл. 3). Так, в поверхностном слое гумусового горизонта (AU1, 5–10 см) и в горизонтах ВТ повышено содержание трещиновидных пор (до 8–11%). Во всех гумусовых горизонтах, включая ВГГ, содержание изометричных изрезанных пор превышает 35% от общего количества пор в поле зрения. При этом ВГГ выделяется среди остальных горизонтов максимальным содержанием изометричных изрезанных пор ($0.4 < F \leq 0.6$) и пор с округлыми срезами ($0.8 < F \leq 1.0$). Наличие последних согласуется с литературными данными, полученными ранее на качественном уровне [8].

Методом кластерного анализа было охарактеризовано сходство и различие исследованных горизонтов темно-серой почвы по форме их тонких макропор (рис. 4). Уровень сходства более 80% обнаружен для нижней части современного гумусового горизонта (AU2 и AU3el). Благодаря наличию трещиновидных пор весьма высокое сходство обнаружено между горизонтами AU1 и BT1el, BT2 (65–70%). На этом фоне второй гумусовый горизонт резко отличается от всех горизонтов профиля. Уровень его сходства с остальными горизонтами составляет 30–40%.

Специфика порового пространства ВГГ связана с обилием морфонов, имеющих четко выраженную зернисто-комковатую структуру. Если для современных гумусовых горизонтов характерно обилие вытянутых изрезанных пор с фактором формы $F \leq 0.4$, то в горизонте ВГГ более половины тонких макропор представлено изометричными изрезанными порами упаковки комковатых агрегатов с фактором формы $0.4 < F \leq 0.6$ (табл. 3). Благодаря этому ВГГ является единственным в

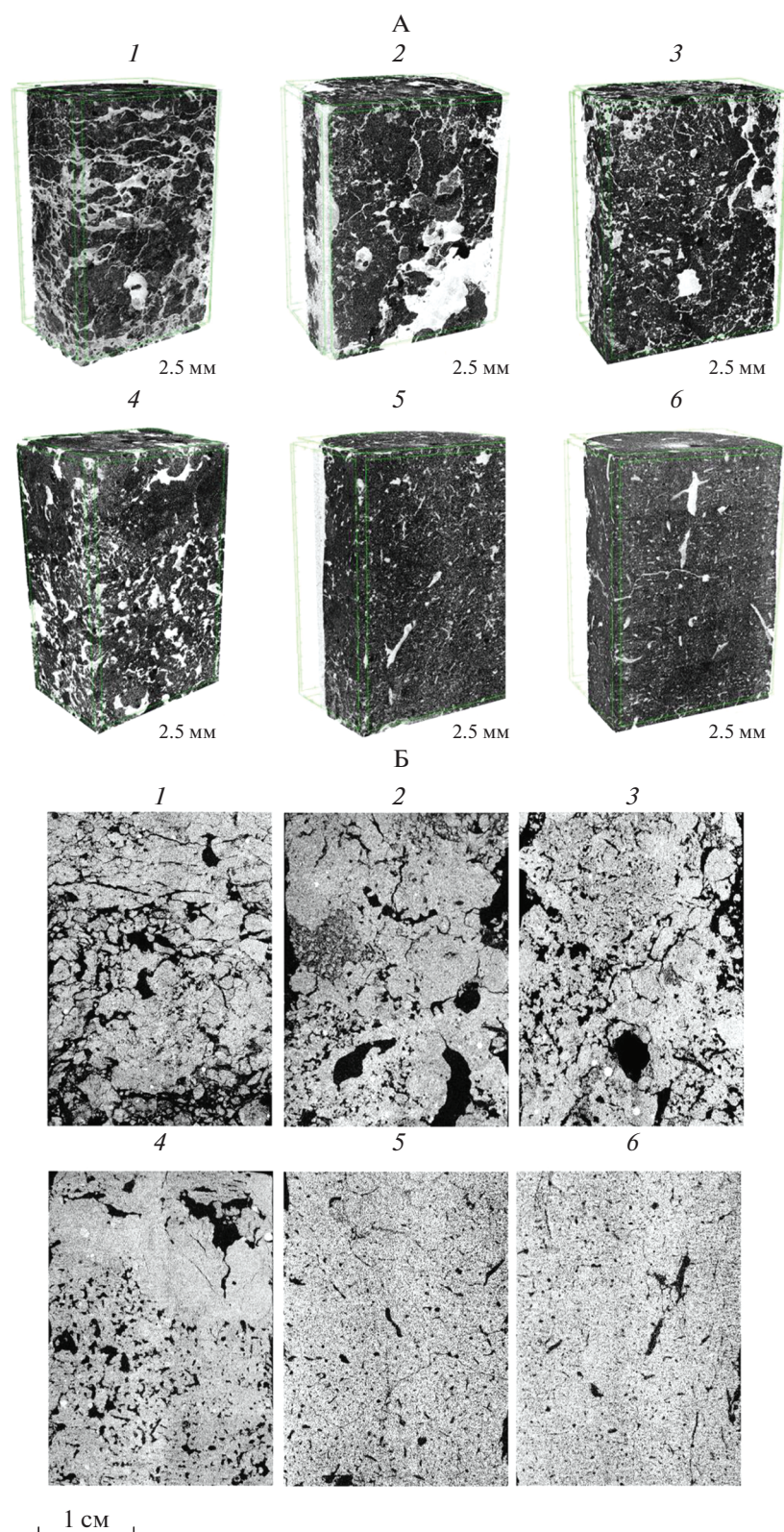


Рис. 3. Томографические 3D (А, поры светлые) и 2D (Б, поры темные) реконструкции монолитов $d=3$ см, $h=4$ см из темно-серой почвы с ВГГ. Горизонты: 1 – AU1, 2 – AU2, 3 – AU3el, 4 – AUel,hh, 5 – BT1el, 6 – BT2.

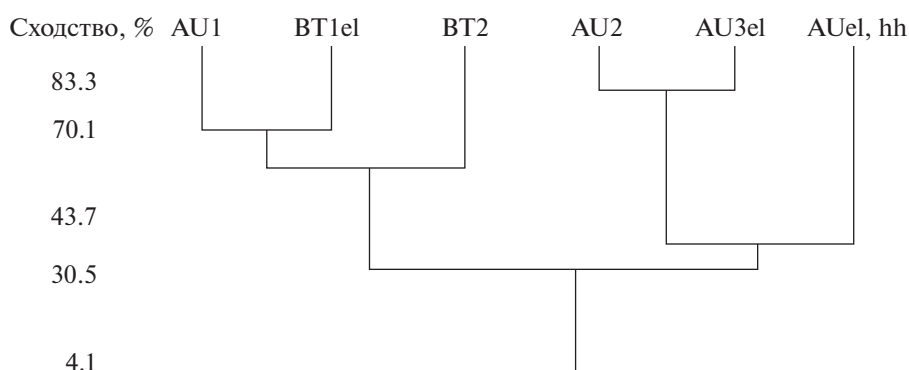


Рис. 4. Дендрограмма сходства генетических горизонтов темно-серой почвы с ВГГ по форме пор $d = 0.1–2$ мм.

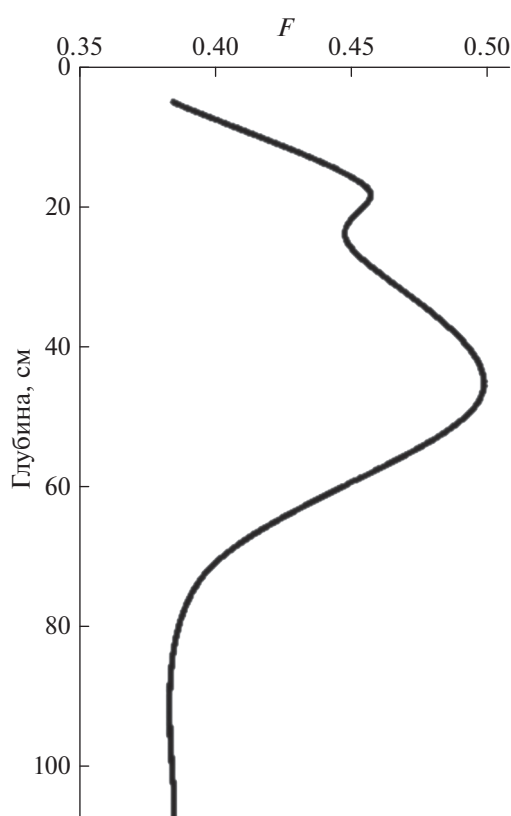


Рис. 5. Профильное распределение средних арифметических значений фактора формы F для пор $d = 0.1–2$ мм в темно-серой почве с ВГГ.

профиле горизонтом, поровое пространство которого характеризуется средними значениями фактора формы $F = 0.5$ (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют заключить, что качественные и количественные томографические данные о мезопорах и тонких мак-

ропорах $d = 0.03–2$ мм являются информативными показателями структурной организации темно-серой лесной почвы с ВГГ. Для пор данного размера профильные распределения открытой и общей томографической пористости позволяют разделить профиль почвы на 3 части: рыхлую (0–30 см), уплотненную (30–60 см) и плотную (глубже 60 см). Горизонт ВГГ расположен в пределах средней части (30–60 см) и занимает среднее положение по величинам общей и открытой томографической пористости. Закрытая томографическая пористость имеет низкие значения во всех агрегированных горизонтах, включая ВГГ. Сопоставление величин закрытой томографической пористости в процентах от объема образца и в процентах от общей томографической пористости выявило двойственную природу ВГГ: по первому показателю он мало отличается от горизонта AU3el, а по второму приближается к горизонту BT1el.

Срединное положение данного ВГГ в текстурно-дифференцированном профиле исследованной почвы позволяет сравнить его с переходным горизонтом BEL дерново-подзолистых почв. Оба эти горизонта расположены на границе элювиальной и иллювиальной толщи почвы в зоне утяжеления гранулометрического состава, что позволяет ожидать некоторого сходства их структурного состояния и строения тонких почвенных макропор ($d = 0.1–2$ мм). Однако этого не было обнаружено.

Ранее показано, что в дерново-подзолистой почве по данным кластерного анализа сходство гранулометрического состава горизонта BEL с горизонтом BT1 выражено сильнее, чем с горизонтами AU, AEL, EL (46 и 35% соответственно) [10 (рис. 4, 1)]. При этом утяжеление гранулометрического состава не мешает формированию в горизонте BEL структуры с элементами пластинчатости (в белесых облегченных фрагментах) и плитчатости (в бурых утяжеленных фрагментах). Благодаря такой структурной организации форма

и ориентация тонких почвенных макропор в горизонте ВЕL имеет высокий уровень сходства с горизонтами ЕL и АЕL (80–86%). В то время как уровень сходства с текстурными горизонтами не превышает 30–40% [10 (рис. 4, III)].

В горизонте ВГГ наблюдается другая ситуация. По гранулометрическому составу ВГГ близок скорее к гумусовым горизонтам АU2 и АU3el (уровень сходства 45%), чем к текстурным горизонтам (сходство 31%). Что касается формы почвенных пор, то по этому показателю ВГГ не имеет существенного сходства ни с современными гумусовыми, ни с текстурными горизонтами профиля. Данная особенность ВГГ связана с обилием морфонов, имеющих четко выраженную зернисто-комковатую структуру. Если для современных гумусовых горизонтов характерна склонность к угловато-плитчатому (горизонт АU1) и угловато-блоковому (горизонты АU2 и АU3el) строению агрегатов и их агломератов, для которых специфично обилие вытянутых изрезанных пор с $F \leq 0.4$, то в горизонте ВГГ более половины тонких макропор представлено изометричными изрезанными порами упаковки зернисто-комковатых агрегатов. Благодаря этому в исследованной почве ВГГ является единственным горизонтом, в котором среднее арифметическое значение фактора формы F для пор $d = 0.1–2$ мм достигает величины $F = 0.5$. Полученные данные позволяют говорить о специфичности структуры и порового пространства ВГГ в темно-серых почвах. Следует также подчеркнуть, что для морфологической диагностики порово-структурного состояния почвы форма пор более информативна, чем их томографические объемы, которые, как и любые другие объемные показатели, не несут информации о геометрии пор и агрегатов. Применительно к исследованной почве важно отметить, что отличие ВГГ от современных гумусовых горизонтов по форме тонких макропор можно расценивать как дополнительный аргумент в пользу реликтового происхождения второго гумусового горизонта.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику отдела генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” к. с.-х. н. С.Ф. Хохлову за помощь в подготовке и описании почвенного разреза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19–29–05112 мк) с привлечением оборудования Центра коллективного пользования оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” ФГБНУ

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” (рег. номер 441994, <https://ckp-rf.ru/ckp/441994/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
2. Железова А.Д., Кутовая О.В., Дмитренко В.Н., Тхакахова А.К., Хохлов С.Ф. Оценка количества ДНК разных групп микроорганизмов в генетических горизонтах темно-серой почвы // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. № 78. С. 87–98.
3. Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам // Почвоведение. 2019. № 1. С. 61–69. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010064>
4. Карпачевский Л.О. Динамика свойств почвы. М.: ГЕОС, 1997. 169 с.
5. Карпачевский Л.О. Особенности формирования среднерусской полосы // История и современность. 2012. № 1(15). С. 147–154.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. Ларионов А.К. Методы исследования структуры грунтов. М.: Недра, 1971. 200 с.
8. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 3. № 4. С. 1–468.
9. Скворцова Е.Б. Изменение геометрического строения пор и агрегатов как показатель деградации структуры пахотных почв // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1345–1353.
10. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., Ключева В.В., Юдина А.В. Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1328–1336. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16110095>
11. Baniya A., Kawamoto K., Saito T., Komatsu T., Hamamoto S., Sakaki T., Müller K., Moldrup P. Linking pore network structure derived by microfocus X-ray cT to mass transport parameters in differently compacted loamy soils // Soil Research. 2019. V. 57. № 6. P. 642–656. <https://doi.org/10.1071/SR18186>
12. Bruker Micro-CT software support. 2018. Available at <https://www.bruker.com/service/support-upgrades/software-downloads/micro-ct.html> [verified 4 April 2019].
13. Gerke K.M., Korostilev E.V., Romanenko K.A., Karsanina M.V. Going submicron in the precise analysis of soil structure: A FIB-SEM imaging study at nanoscale // Geoderma. 2020. V. 383. Art. 114739. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114739>
14. Helliwell J., Sturrock C., Grayling K., Tracy S., Flavel R., Young I. et al. Applications of X-ray computed tomog-

- raphy for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review // *Eur. J. Soil Sci.* 2013. V. 64. P. 279–297.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12028>
15. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2014. 181 p.
 16. Kumi F., Mao H.P., Hu J.P., Ullah I. Review of applying X-ray computed tomography for imaging soil-root physical and biological processes // *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2015. V. 8(5). P. 1–14.
<https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150805.1490>
 17. Mady A.Y., Shein E.V., Skvortsova E.B., Abrosimov K.N. Evaluate the Impact of Porous Media Structure on Soil Thermal Parameters Using X-Ray Computed Tomography // *Eurasian Soil Science.* 2020. V. 53. № 12. P. 1752–1759.
<https://doi.org/10.1134/S1064229320120066>
 18. Maenhout P., Van den Bulcke J., Van Hoorebeke L., Cnudde V., De Neve S., Sleutel S. Nitrogen Limitations on Microbial Degradation of Plant Substrates Are Controlled by Soil Structure and Moisture Content // *Front Microbiol.* 2018. V. 9. P. 1433.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01433>
 19. Romanenko K.A., Skvortsova E.B., Rozhkov V.A. Form and orientation of soil pores as indicators of a structural soil organization // *IOP Conference Series.* 2019. V. 368. № 012041. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012041>
 20. Taina I.A., Heck R.J., Elliot T.R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review // *Can. J. Soil Sci.* 2008. V. 88(1). P. 1–19.
<https://doi.org/10.4141/CJSS06027>

Spatial Organization of Pores in Dark Gray Soil with a Second Humus Horizon (Tomographic Analysis)

E. B. Skvortsova^{1, *}, K. N. Abrosimov¹, V. N. Shchepot'ev¹, and V. N. Dmitrenko¹

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: eskvora@mail.ru

A quantitative morphological study of pores in a dark gray soil with a second humus horizon (Luvic Reti Greyzem Phaeozem (Loamic) [14]) of the Kashira raion of the Moscow oblast was performed. The aim of the work was to establish the specific features of the spatial organization of soil pores as new diagnostic features of polygenetic soils with a second humus horizon (SHH) on the territory of the East European Plain. The studies were carried out using a laboratory microtomograph Bruker SkyScan 1172 (Dokuchaev Soil Science Institute). It is shown that for the diagnostics of the pore-structural state of the second humus horizon, the level of mesopores and fine macropores is more informative than the level of coarse macropores. In the pore range $d = 0.03\text{--}2\text{ mm}$, the analysis of closed tomographic porosity revealed the dual nature of the second humus horizon: in terms of the volume of closed pores in the sample, it differs little from the AU3 horizon, and in the proportion of closed pores in the pore space it approaches the BT1 horizon. The diagnostic significance of the shape of soil pores has been confirmed. It was revealed that in the second humus horizon, more than half of the pores $d = 0.1\text{--}2\text{ mm}$ are represented by isometric sinuous packing pores of crumb-granular aggregates. Due to this, the arithmetic mean value of the form factor F for thin macropores in this horizon reaches $F = 0.5$. The difference between SHH and modern humus horizons in the shape of thin macropores can be regarded as an additional argument in favor of the relic origin of the second humus horizon.

Keywords: polygenetic soils, soil porosity, pore shape, pore shape factor, pore micromorphometry