

УДК 631.411.6

СТРОЕНИЕ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ПОДЗОЛИСТЫХ ГОРИЗОНТАХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ (АНАЛИЗ 2D И 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ)*

© 2013 г. Е. Б. Скворцова, К. М. Герке, Д. В. Корост,
К. Н. Абросимов

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7*

На основе сравнительного анализа двумерных (в шлифах) и трехмерных (X-ray CT) изображений получены новые данные о строении порового пространства гор. E1 дерново-подзолистой почвы. Трехмерные изображения почвенной массы и порового пространства построены с помощью компьютерной реконструкции на основе множества двумерных теневых рентгеновских проекций. Показано, что в гор. E1 помимо горизонтальных трещиновидных пор, разделяющих пластинчатые агрегаты, имеется большое количество изолированных пузырьковых пор неизвестного генезиса. В почвообразующем покровном суглинке (гор. С) в отличие от подзолистого горизонта пузырьковые поры встречаются единично. Большинство пор с округлыми срезами представляют собой современные и реликтовые ходы корней. Полученные данные дополняют многочисленные сведения о строении подзолистых горизонтов дерново-подзолистых почв в целом и порового пространства этих горизонтов в частности. Благодаря проведенным исследованиям увеличен перечень генетических различий в строении педогенных и литогенных горизонтов дерново-подзолистых почв.

Ключевые слова: поры, агрегаты, подзолистый горизонт, микроморфология, рентгеновская компьютерная микрофотография.

ВВЕДЕНИЕ

На Европейской территории России дерново-подзолистые почвы всесторонне и глубоко изучены. В том числе проведено и опубликовано множество морфологических и микроморфологиче-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грантов 12-05-01130-а, 12-05-33089-мол_а_вед и 12-04-32264-мол_а, № 13-04-00409-а.

ских исследований (Таргульян и др., 1974; Русанова, 1987; Кулинская, 1988; Макеев, Маккев, 1989; Герасимова и др., 1992). Однако некоторые свойства дерново-подзолистых почв до настоящего времени исследованы и охарактеризованы не в полном объеме. Так, отсутствует всестороннее представление о строении порового пространства подзолистых горизонтов, являющихся важным диагностическим и функциональным компонентом профиля этих почв.

Известно, что в дерново-подзолистых почвах южной тайги подзолистые горизонты имеют сложное и многообразное микростроение. На фоне пластинчатой структуры в них встречаются обогащенные плазмой микрзоны, отдельные глинистые папулы и кутаны, плотные четко очерченные ортштейны. Неоднородность твердой фазы подзолистых горизонтов обуславливает неоднородность строения их порового пространства. Для гор. E1 характерны горизонтальные и субгоризонтальные трещиновидные поры упаковки пластинчатых структурных отделностей, тонкие серповидные поры между ортштейнами и основной почвенной массой, разнообразные биогенные полости. Многие из этих пор могут быть исследованы в плоских срезах почвы (шлифах). Однако анализ почвенных пор в двумерных срезах имеет множество методических ограничений, главным из которых является условие однородности строения и расположения пор в пространстве. Подзолистые горизонты не соответствуют этому требованию. Поэтому наиболее полное представление о морфологическом строении почвы вообще и подзолистых горизонтов в частности можно получить, исследуя их объемные трехмерные изображения. В настоящее время появилась возможность таких исследований с помощью рентгеновской компьютерной томографии.

Рентгеновская компьютерная томография (X-ray CT) представляет собой неразрушающий метод визуализации и анализа внутренней структуры образцов с использованием рентгеновского излучения. Авторами метода являются американский физик Алан Кормак и английский инженер-физик Годри Хаунсфилд. Первый решил задачу томографического восстановления изображений (получения поперечных плотностных рентгеновских срезов из набора теневых проекций), второй впервые сконструировал компьютерный рентгеновский томограф. Первоначально томографы при-

менялись в медицинских целях. Затем после появления приборов с более высоким разрешением (микротомографов), X-ray CT стали использоваться для решения физических, химических, биологических, геологических задач.

Основными узлами современного микротомографа являются источник лучей (рентгеновского, нейтронного или гамма излучения), вращающийся предметный столик для образцов и детектор излучения в виде ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрицы (рис. 1).

Снимок, получаемый при повороте образца на некоторый угол, называется теневой проекцией, тональность которой определяется ослаблением излучения за счет рассеивания и поглощения материалами объекта. На основе набора теневых проекций производится реконструкция, в результате которой получается стек двумерных изображений исследуемой среды. Данные хранятся в виде двумерных срезов среды, общая совокупность которых представляет информацию о трехмерном строении объекта. В большинстве современных томографов есть возможность сканировать структуру образца с расстоянием между срезами, равным разрешению срезов, что позволяет пересчитывать стеки изображений из одной плоскости в другую. Один из этапов перехода к трехмерному изображению почвы показан на рис. 2.

Основными преимуществами томографического метода являются: 1) возможность быстрого и точного трехмерного получения данных (в зависимости от устройства томографа и желаемого разрешения изображений время сканирования может составлять от нескольких минут до десятка часов); 2) неинвазивность метода (исследование производится без нарушения структуры и свойств

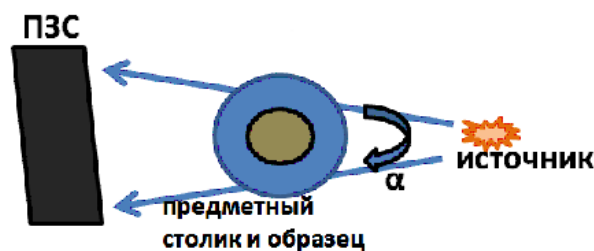


Рис. 1. Схема устройства микротомографа (вид сверху).

образца); 3) возможность точного разделения изображения на различные фазы и компоненты за счет применения сканирования на различных энергиях излучения.

По сравнению с томографией метод изготовления и исследования шлифов требует значительного времени, трудоемок, приводит к утрате образца, при этом количество получаемых шлифов ограничено.

В почвоведении первые работы с применением компьютерной томографии появились за рубежом в конце XX в. (Crestana et al., 1986; Anderson et al., 1988; Pires et al., 2010, 2011). В нашей стране томографические исследования почв были начаты в 2011 г. и продолжают в настоящее время в Почвенном институте им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии и Геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. (Герке и др., 2012; Korost et al., 2012; Корост и др., 2012). К сегодняшнему дню сложилась ситуация, при которой трехмерный анализ строения почвы может занять достойное место среди общепринятых методов исследования.

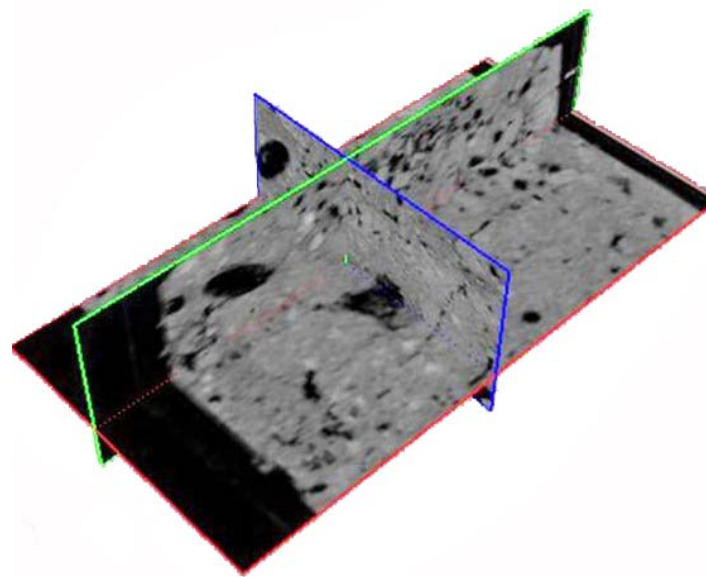


Рис. 2. Продольные и поперечные срезы через образец из гор. EL дерново-подзолистой почвы.

Это особенно актуально в связи с бурным развитием междисциплинарных работ и особым интересом к проблемам моделирования почвенных процессов и классификации почв, где существенное место занимают вопросы морфогенеза.

Целью данной работы является получение новых данных о строении порового пространства гор. EL дерново-подзолистой почвы на основе сравнительного анализа его двумерных (в шлифах) и трехмерных (X-ray CT) изображений. В статье обсуждаются морфологические свойства порового пространства гор. EL, выявленные с помощью компьютерной реконструкции трехмерного изображения на основе множества двумерных теневых рентгеновских проекций. Для сравнения исследовано строение порового пространства покровного суглинка гор. С дерново-подзолистой почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовали целинную дерново-подзолистую почву на плоском водоразделе под 80–90-летним ельником сложным в районе д. Дарьино Пушкинского района Московской области. Почва развита на покровных суглинках, подстилаемых некарбонатной мореной на глубине более 2–3 м. Профиль исследованной почвы имеет следующее строение (индексация горизонтов по «Классификации почв России» (2004)):

AУ, неоднородный по мощности от 0 до 4–7 см – темно-серый, свежий, очень рыхлый, структура комковато-порошистая, по корням – очень мелкие непрочные комки, легкий суглинок (на грани с супесью), очень зоогенный, очень много корней, граница неровная, четко заметна по цвету, плотности, структуре.

AEL, 4(7)–12(17) см – буровато-палевый, слабо увлажнен, слабо уплотнен, пылеватый легкий суглинок, хорошо выраженная тонкая плитчатость (пластинчатость), в нижней части гор. AEL много мелких Fe-Mn ортштейнов. Черные червороины, ходы корней, граница с нижележащим гор. EL неровная, переход отчетлив по окраске.

EL, (12(17)–28(23–24) – белесый с палевым оттенком, очень светлый, есть диффузные пятна с более выраженной палевой окраской, слабо увлажнен, уплотнен, мелкопористый, пылеватый легкий суглинок, структура пластинчатая, толщина пластинок ~ 2 мм, много мелких Fe-Mn конкреций, есть мелкие (<1–2 мм) глинистые включения, переход к гор. BEL постепенный.

BEL, (23–24)– 45 см – пестроокрашен, слабо увлажнен, неоднородный по гранулометрическому составу, чередуется материал гор. EL и BT. Материал гор. EL в виде трещин и карманов, есть морфоны «клюква в сахаре»: мелкие плотно упакованные фрагменты гор. BT в толще гор. EL. Переход постепенный, заметен по окраске, плотности, структуре.

BT1, 45–65 см – бурый до шоколадного, с темными глинистыми кутанами, плотный, средний суглинок, структура неясноплитчатая, разбивается на мелкие и средние ореховатые отдельности, есть узкие белесые языки, белесая присыпка, переход постепенный.

BT2, 65–80 см – коричневый, увлажнен, плотный, средний суглинок, крупнопризматический, с кутанами, скелетанами, гумусовыми потеками, переход постепенный.

BC, 80–130 см – коричневый с грязновато-палевым оттенком, плотный, вязкий, увлажнен, по трещинам слабо оглеен (с глубины ~ 100 см).

Cg, >130 см – грязновато-темно-палевый, влажный, пылеватый средний суглинок. Оглеен: по трещинам сизые потеки, много мелких ортштейнов, примазок, вязкий, плотный, структура крупнопризматическая до глыбистой, есть тенденция к горизонтальной делимости.

В генетических горизонтах исследованной почвы (рис. 3) представлены основные типы агрегатных структур, характерных для суглинистых почв южной тайги (комковатая, пластинчатая, ореховатая, призматическая, массивная), и их переходные формы. Соответственно, в почвенной массе присутствуют различные формы порового пространства, характерные для данных структур.

Поровое пространство изучали в образцах ненарушенного сложения (микромонолитах) размером 5.0×3.5×1.2 см, отобранных на глубинах 17–23 (гор. EL) и 150–155 см (гор. C). Образцы были высушены на воздухе до воздушно-сухого состояния, что позволило наиболее полно выявить генетические различия в морфологическом строении агрегатов и порового пространства почвы.

Для получения 3D изображений высушенные образцы анализировали на микротомографе высокого разрешения SkyScan 1172 (Бельгия) с энергией пучка 100 кэВ и разрешением 15.8 мкм. Полученные стеки срезов почвы обрабатывали с помощью свободно

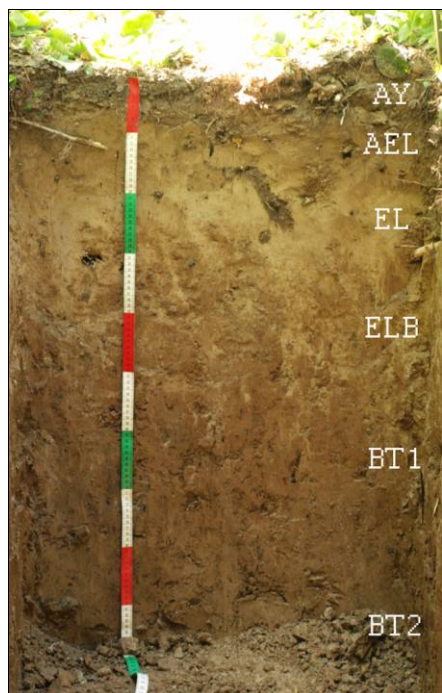


Рис. 3. Профиль дерново-подзолистой почвы под 80–90-летним ельником сложным в районе д. Дарьино Пушкинского района Московской области.

распространяемых программах ImageJ и ПО фирмы SkyScan. Из полученных изображений вырезали области, непосредственно содержащие информацию о строении образца (без краевых зон). Для трехмерной визуализации порового пространства все изображения в стек разделяли на две фазы: твердое вещество и поровое пространство. Разделение производили подборкой одиночного порогового значения по гистограмме интенсивностей пикселей (как среднее значение между пиками, соответствующими двум указанным фазам).

После сканирования на микротомографе SkyScan 1172 из тех же образцов были изготовлены плоские микроморфологические шлифы вертикальной ориентации. В шлифах исследовали 2D изображения срезов пор с таким же разрешением, как и на микро-

томографе. Указанное разрешение позволяет исследовать поры крупнее 100–150 мкм (тонкие макропоры почвы).

Основные химические, физические показатели и данные о гранулометрическом составе исследованной почвы были получены в Аналитической инструментальной лаборатории ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева и приведены в табл. 1–3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гор. EL исследованных почв имеет легкосуглинистый пылеватый гранулометрический состав, небольшое содержание ила (5.7%), малую гумусированность и умеренно уплотненное сложение. Общая пористость почвенной массы гор. EL в среднем составляет 43%.

Микроморфологический анализ показал, что видимое в шлифе поровое пространство в основном представлено порами

Таблица 1. Гранулометрический (над чертой) и микроагрегатный (под чертой) состав дерново-подзолистой почвы

Горизонт	Глубина образца, см	Гигроскопическая влажность, %	Содержание фракций, %; размер частиц, мм						Сумма частиц	
			1.0–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	>0.01	<0.01
AY*	0–4	1.56	<u>0.7</u> 35.1	<u>15.2</u> 29.4	<u>57.3</u> 30.8	<u>10.3</u> 3.5	<u>9.5</u> 0.9	<u>7.0</u> 0.3	<u>73.2</u> 95.3	<u>26.8</u> 4.7
AEL	6–12	0.94	<u>0.6</u> 21.0	<u>8.6</u> 20.7	<u>59.7</u> 46.1	<u>10.7</u> 7.4	<u>10.7</u> 4.4	<u>9.6</u> 0.4	<u>69.0</u> 87.7	<u>31.0</u> 12.2
EL	17–23	0.49	<u>0.3</u> 3.1	<u>8.6</u> 17.6	<u>65.1</u> 63.5	<u>10.7</u> 9.3	<u>9.6</u> 6.3	<u>5.7</u> 0.2	<u>74.0</u> 84.2	<u>26.0</u> 15.8
BEEL	30–40	1.48	<u>1.0</u> 2.8	<u>6.2</u> 24.5	<u>47.7</u> 56.3	<u>10.2</u> 8.3	<u>10.6</u> 7.2	<u>24.4</u> 0.9	<u>54.8</u> 83.6	<u>45.2</u> 16.4
B1	50–60	2.25	<u>0.9</u> 2.5	<u>5.5</u> 23.6	<u>40.8</u> 57.3	<u>9.4</u> 8.9	<u>10.8</u> 5.9	<u>32.6</u> 1.8	<u>47.2</u> 83.4	<u>52.8</u> 16.6
B2	70–80	2.81	<u>0.9</u> 3.0	<u>6.8</u> 18.1	<u>32.7</u> 55.3	<u>10.5</u> 11.6	<u>12.7</u> m9.0	<u>35.4</u> 3.0	<u>41.4</u> 76.4	<u>58.6</u> 23.6
C	150–155	2.71	<u>6.0</u> 7.7	<u>16.4</u> 19.9	<u>24.2</u> 41.2	<u>9.7</u> 14.6	<u>14.6</u> 13.9	<u>29.0</u> m2.8	<u>46.7</u> 68.7	<u>53.3</u> 31.3

* Присутствуют растительные остатки.

Таблица 2. Химические свойства дерново-подзолистой почвы

Горизонт	Глубина образца, см	Гумус, %	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Ca _{обм}	Mg _{обм}	Fe ₂ O ₃ , %	
							по Тамму	по Мера-Джексону
AY	0–4	5.72	4.73	3.91	7.93	0.43	0.67	1.07
AEL	6–12	1.11	4.63	3.81	0.98	0.07	0.68	1.04
EL	17–23	0.42	4.52	3.85	1.00	0.03	0.30	0.62
BEL	30–40	0.31	5.04	3.56	8.54	1.60	0.47	1.45
B1	50–60	0.16	5.20	3.41	16.3	4.16	0.39	1.99
B2	70–80	0.84	5.43	3.48	21.3	6.29	0.37	1.83
C	150–155	1.58	5.80	3.71	17.2	6.12	0.33	1.69

Таблица 3. Физические свойства целинной дерново-подзолистой почвы (*n* = 16) (данные В.Н. Щепотьева, проект РФФИ № 10-04-00353а)

Горизонт	Глубина, см	Статистика	Плотность, г/см ³	Общая пористость, %	Сопротивление пенетрации, мПа	Влажность, %		Полная влагоемкость, %	Относительное насыщение влагой, %
						от массы	от объема		
AY	0–4	<i>M</i>	0.76	70.88	35.81	29.49	22.13	95.06	31.31
		<i>s</i>	0.07	2.96	5.53	3.33	1.93	12.21	3.32
		<i>m</i>	0.02	0.74	1.38	0.83	0.48	3.05	0.83
AEL	6–11	<i>M</i>	1.23	53.44	105.37	21.32	26.38	34.94	49.81
		<i>s</i>	0.11	3.97	19.43	1.74	1.63	6.80	5.73
		<i>m</i>	0.03	0.99	4.86	0.44	0.41	1.70	1.43
EL	17–23	<i>M</i>	1.53	43.31	202.13	17.34	26.50	28.62	61.69
		<i>s</i>	0.08	3.14	36.14	0.70	1.16	3.77	6.75
		<i>m</i>	0.02	0.78	9.04	0.18	0.37	0.94	1.69
BT	55–60	<i>M</i>	1.63	40.63	236.81	22.25	36.12	25.19	89.56
		<i>s</i>	0.07	2.85	57.17	1.12	1.36	3.17	6.17
		<i>m</i>	0.02	0.71	14.29	0.28	0.34	0.79	1.54
C	150–155	<i>M</i>	1.74	36.81	203.31	20.39	35.50	21.19	96.37
		<i>s</i>	0.05	1.83	43.08	0.77	0.89	1.56	5.69
		<i>m</i>	0.01	0.46	10.77	0.19	0.22	0.39	1.42

Примечание. *M* – среднее арифметическое; *s* – стандартное отклонение; *m* – ошибка среднего.

четырёх видов: 1) горизонтальные тонкие (<0.2–0.3 мм) трещиновидные поры между пластинчатыми структурными отдельностями, 2) тонкие (<0.1 мм) серповидные поры вокруг ортштейнов, глинистых папул и других округлых агрегатов, 3) гладкостенные вытянутые каналы диаметром до 0.5 мм (как правило, ходы корней) и 4) изометричные (в срезах) поры более или менее округлой формы. Диаметр округлых пор 1 мм. Присутствуют также изометричные изрезанные поры между округлыми агрегатами и поры ваги, защемленные в почвенной массе. Аналогичные поры видны в двумерных теневых рентгеновских проекциях образца из этого горизонта (рис. 4А).

Гор. С существенно отличается от гор. EL по основным физическим и химическим свойствам. Материал горизонта характеризуется меньшей пылеватостью, почти в 5 раз более высоким содержанием ила, большей плотностью и низкими значениями общей пористости. По гранулометрическому составу гор. С занимает промежуточное положение между тяжелым суглинком и легкой

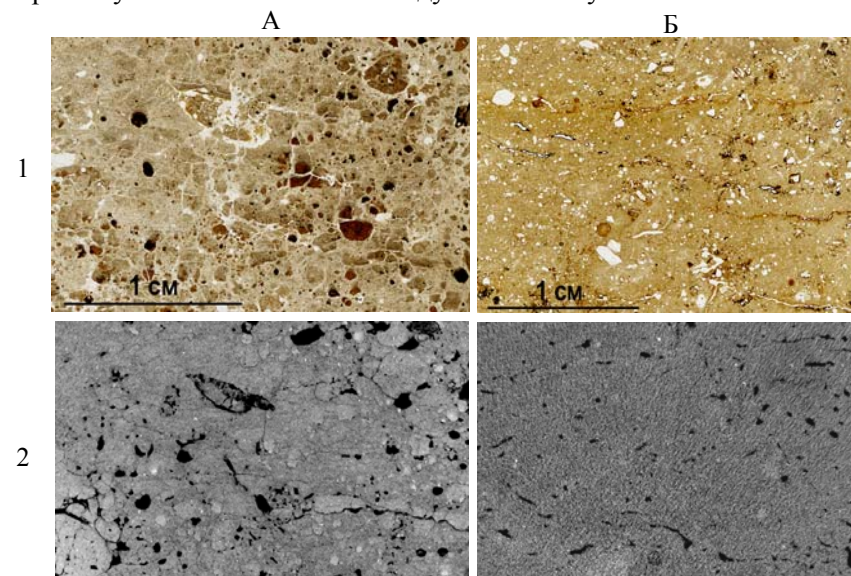


Рис 4. Двумерные изображения шлифов (1) и теневых рентгеновских проекций (2) из гор. EL (А) и гор. С (Б) дерново-подзолистой почвы.

глиной (содержание физической глины 53%). Материал горизонта оглеен, структура крупно-призматическая до глыбистой.

В то же время картина порового пространства в двумерных срезах гор. С и EL имеет много общего. В шлифах и рентгеновских проекциях из гор. С, как и в гор. EL, присутствуют тонкие трещиновидные поры, гладкостенные каналы и камеры, поры с изометричными округлыми срезами (рис. 4Б). В сравниваемых горизонтах поры могут различаться по размерам (и ориентировке), однако по форме их можно считать однотипными. Сходство формы порового пространства в гор. С и EL иллюстрируют также эмпирические распределения срезов пор по фактору формы $F = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$, где S – площадь, P – периметр, D – поперечный габарит и L – продольный габарит срезов пор в шлифах (рис. 5). Для обоих горизонтов отмечено повышенное содержание пор с трещиновидными и округлыми срезами.

Иная картина наблюдается при сравнении 3D изображений. Объемное изображение показывает, что в гор. EL большинство пор с округлыми срезами представляют собой изолированные или

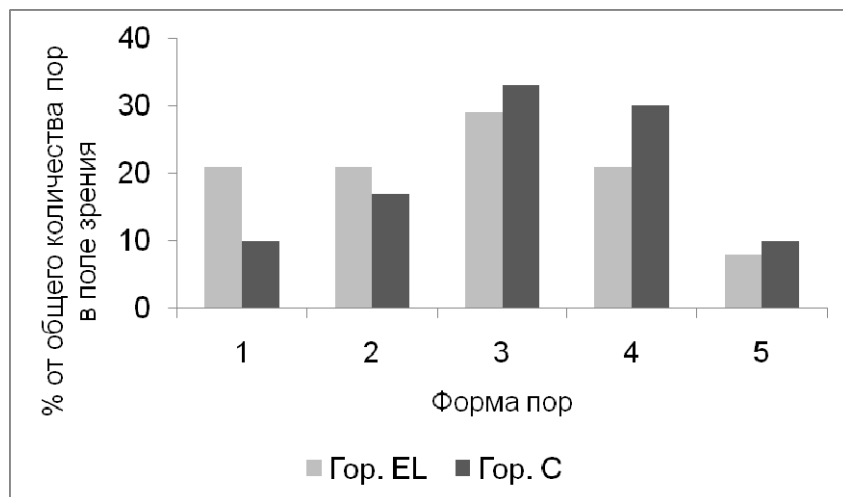


Рис. 5. Распределения пор по фактору формы срезов в шлифах: 1 – трещиновидные ($F \leq 0.2$); 2 – вытянутые изрезанные ($F = 0.21-0.40$); 3 – изометричные изрезанные ($F = 0.41-0.60$); 4 – изометричные слабоизрезанные ($F = 0.61-0.80$); 5 – округлые ($F = 0.81-1.0$).

связанные тонкими каналами пузырьки (рис. 6А). Напротив, в гор. С пузырьковые поры присутствуют единично, практически все поры с округлыми срезами являются современными или реликтовыми ходами корней (рис. 6Б).

Появление пузырьковых пор в почве обычно наблюдают в поверхностных корковых горизонтах (Лебедева (Верба) и др., 2009; Turk and Graham, 2011). Наличие многочисленных пузырьков в элювиальном горизонте дерново-подзолистых почв на глубине 17–23 см ранее детально не обсуждалось. Многие авторы при тщательном макро- и мезоморфологическом описании отмечали видимую невооруженным глазом пористость почвенной массы в гор. EL (Таргульян и др., 1974; Макеев, Макеев, 1989; Бронникова, Таргульян, 2005). Однако форму этих тонких пор не изучали, и причины их появления не рассматривали. Для расшифровки генезиса таких пор необходимы специальные исследования. Возможно, формирование пузырьков связано с биогенным выделением газов в слабоагрегированной почвенной массе. Другой возможной причиной является формирование защемленного воздуха в перио-

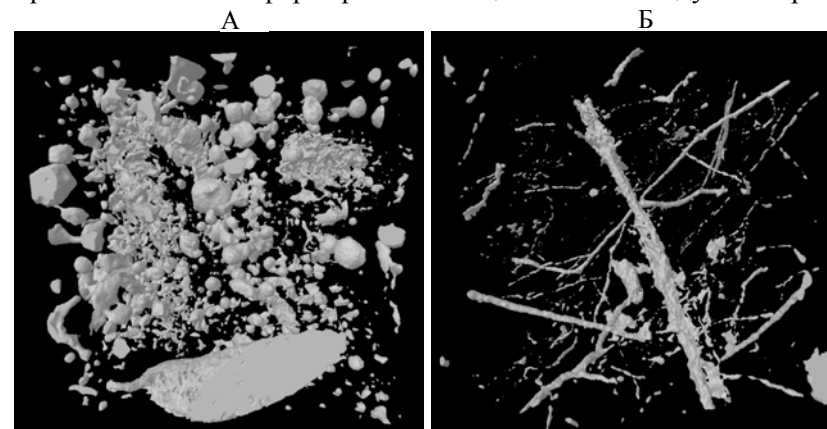


Рис. 6. 3D реконструкции порового пространства в гор. EL (А) и гор. С (Б) дерново-подзолистой почвы. Формат кадра 1×1 см. Поры белые. В нижней части рис. 6А виден крупный срез корневого хода. На рис. 6Б тонкие каналы имеют разрывы в результате недостаточно высокого разрешения. Видео 3D реконструкций порового пространства размещено на сайтах: <http://www.youtube.com/watch?v=FcrRsfk2bn0> (гор. EL) и <http://www.youtube.com/watch?v=XESPqe7Ti7Q> (гор. С).

ды сезонного промерзания и оттаивания почвенной толщи. Если в гумусовом горизонте свободные объемы воздуха легко перемещаются в биогенно оструктуренной почве, то в гор. ЕL следы выделения газов могут сохраниться в виде везикулярных пор.

Отсутствие или малое содержание пузырьковых пор в гор. С можно объяснить тем, что толща покровного суглинка на исследованной глубине (150–155 см) по сравнению с гор. ЕL реже испытывает сезонное промерзание. Дополнительными факторами являются тяжелый гранулометрический состав, низкая биологическая активность и недостаточная влажность гор. С в период осенне-зимнего промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили, что анализ почвенных пор в двумерных срезах имеет существенные методические ограничения и недостаточен для исследования анизотричного порового пространства. В двумерных срезах (шлифах) генетически разные гор. ЕL и С содержат сходные по форме округлые поры. При переходе к трехмерным изображениям становится очевидно, что эти поры имеют различное объемное строение. В гор. ЕL округлые срезы принадлежат изолированным и/или сообщающимся пузырьковым порам. В покровном суглинке (гор. С) большинство пор с округлыми срезами представляет собой вытянутые современные и реликтовые ходы корней, а пузырьковые поры встречаются единично.

Полученная информация о строении пор в гор. ЕL и С дополняет перечень генетических различий между педогенными и литогенными горизонтами дерново-подзолистых почв. При этом возникают новые вопросы, связанные с происхождением, эволюцией, функционированием подзолистых горизонтов в целом и их порового пространства в частности. Так, наличие изолированных пузырьковых пор, вероятно, оказывает существенное влияние на фильтрационные и другие водно-физические свойства почвы.

Генезис изолированных пузырьков в толще подзолистых горизонтов пока остается неясным. Подзолистые горизонты залегают на малой глубине, доступной текущим педотурбационным процессам, интенсивному воздействию корней и почвенной фауны. Поэтому реликтовое происхождение пузырьком представляется маловероятным. Их появление можно попытаться объяснить современными процессами: сезонным биологическим выделением газа, перемещением газа в периоды зимне-весеннего промерзания

и оттаивания почвенной толщи, другими физико-химическими процессами, присущими почвенной жизни. Для более глубокого анализа необходимы специальные, возможно, модельные исследования на стыке почвоведения с другими естественными науками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронникова М.А., Таргульян В.О.* Кутанный комплекс текстурно-дифференцированных почв (ни примере дерново-подзолистых суглинистых почв Русской равнины). М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 197 с.
2. *Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А.* Микроморфология почв природных зон СССР. Пушино, 1992. 215 с.
3. *Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В.* Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. 2012. № 7. С. 781–791.
4. *Классификация и диагностика почв России.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. *Корост Д.В., Герке К.М., Скворцова Е.Б.* Исследование структуры почв с помощью рентгеновской томографии: примеры российских почв и перспективы метода // Мат-лы VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования». Петрозаводск–М., 2012. Кн. 2. С. 44–45.
6. *Кулинская Е.В.* Микроморфологическая диагностика текстурно-дифференцированных почв лесной зоны Восточноевропейской равнины. Автореф. дис. ... к. б. н. М., 1988. 24 с.
7. *Лебедева (Верба) М.П., Голованов Д.Л., Иноземцев С.А.* Микростроение пустынных почв Монголии // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1294–1307.
8. *Макеев А.О., Макеев О.В.* Почвы с текстурно-дифференцированным профилем основных криогенных ареалов севера Русской равнины. Пушино, 1989. 272 с.
9. *Русанова Г.В.* Микроморфология таежных почв. Л.: Наука, 1987. 149 с.
10. *Таргульян В.О., Бирин А.Г., Куликов А.В., Целищева Л.К.* Организация, состав и генезис дерново-палево-подзолистой почвы на покровных суглинках. Морфологическое исследование. М.: 10 Мировой конгресс почвоведов, 1974. 54 с.
11. *Anderson S.H., Gantzer C.J., Boone J.M., Tully R.J.* Rapid nondestructive bulk density and soil-water content determination by com-

- puted tomography // Soil Science of America. 1988. V. 52. P. 35–40.
12. *Crestana S., Cesareo R., Mascarenhas S.* Using a computed-tomography miniscanner in soil science // Soil Science. 1986. V. 142. P. 56–61.
 13. *Korost D., Gerke K., Skvortsova E.* Structure differences as a possible mechanism for biomat flow // Geophysical Research Abstracts. 2012. V. 14.
 14. *Pires L.F., Borges J.A.R., Bacchi O.O.S., Reichardt K.* Twenty-five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution // Soil and Tillage Research. 2010. V. 110. P. 197–210.
 15. *Pires L.F., Cassaro F.A.M., Bacchi O.O.S., Reichardt K.* Non-destructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics // Radiation Physics and Chemistry. 2011. V. 80. P. 561–566.
 16. *Turk J.K., Graham R.C.* Distribution and properties of vesicular horizons in the Western United States // Soil Science Society of America J. 2011. T. 75. № 4. P. 1449–1461.

THE PORE SPACE ARRANGEMENT IN PODZOLIC HORIZONS OF LOAMY SOILS (ANALYSIS OF 2D AND 3D IMAGES)

**E. B. Skvortsova, K. M Gerke, D. V. Korost,
K. N. Abrosimov**

A comparative analysis of 2D (in thin sections) and 3D (X-ray CT) images allowed obtaining new data about the pore space arrangement in the EL horizon of soddy podzolic soils. The 3D images of the soil mass and the pore space have been made by reconstruction via computer using a great number of 2D shady X-ray projections. It is shown that the EL horizon reveals not only horizontal fissured pores between platy aggregates but also many isolated vesicular pores of unknown genesis. As distinct from the podzolic horizon such pores are singly met in the soil-forming mantle loam (C horizon). The major pores with rounded edges are represented by recent and relic root holes. The obtained data serve as an additional information on the podzolic horizon configuration in soddy podzolic soils on the whole and the pore space in these horizons in particular. Thanks to this study it is reasonable to conclude that the information on genetic differences in the configuration of pedogenic and lithogenic horizons of the soddy podzolic soils is expanded.

Keywords: pores, aggregates, podzolic horizon, micromorphology, X-ray computed microtomography.