

УДК 631.4

ТОМОГРАФИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ: ОТ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ К СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ОЦЕНКАМ

© 2019 г. А. Л. Иванов¹, Е. В. Шеин^{1,2, *}, Е. Б. Скворцова¹

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

*e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Поступила в редакцию 28.05.2018 г.

После доработки 06.07.2018 г.

Принята к публикации 29.08.2018 г.

Обсуждается развитие томографических исследований почвенных пор в российском почвоведении в 2011–2018 гг. Показано, что за этот период пройден путь от качественного исследования пор в некоторых почвах европейской территории России до количественной функциональной оценки порового пространства на основе трехмерных томографических моделей. Выделено 3 этапа томографических исследований почвенных пор: 1 – проведение качественного анализа порового пространства как пространственно-геометрического показателя почвенной структуры и как самостоятельного компонента морфологического строения почвы; 2 – получение количественных морфометрических данных о форме, размерах и ориентации пор и сопоставление томографических данных о порах с физическими исследованиями; 3 – использование томографических расчетных параметров в изучении важных для теоретического и практического почвоведения гидрологических и физико-механических свойств почв. Исследования последних лет сосредотачиваются на оценке связи томографических параметров порового пространства с традиционными гидрологическими константами, на возможности расчета ОГХ и функции влагопроводности по томографическим параметрам почвенного порового пространства, а также на количественной оценке и прогнозе деградации почв по томографическим данным. Решение указанных задач позволит объяснить физические явления, лежащие в основе гидрологических характеристик почв, а также обосновать использование томографических показателей в практическом почвоведении, гидрологии и агрофизике.

Ключевые слова: морфология, микроморфология, микроморфометрия, трехмерные модели пор, гидрологические свойства, почвенные функции

DOI: 10.1134/S0032180X19010064

ВВЕДЕНИЕ

Поровое пространство почв всегда занимало одно из ведущих мест в исследованиях почвоведов. С порами связывали важнейшие функции почв в биосфере: водопроницающую, водосохраняющую, водоочищающую, газовую. В связи с характеристиками порового пространства рассматривалась активная биологическая деятельность различных почвенных микроорганизмов, определялась роль различных барьеров (геохимических, гидрологических и др.). При изучении порового пространства вычленили поры, имеющие функции быстрого освобождения почв от избытка гравитационной влаги (функция дренажа), поры, определяющие запасающую функцию почвы (запасы доступной воды, питательных веществ), а также поры, содержащие недоступные для растений влагу и питательные вещества. Безусловно,

одним из первых фундаментальных открытий в области оценки порового пространства стало предложенное А.Г. Дояренко и развитое Н.А. Качинским учение о дифференциальной пористости почвы как об объемах пор, принадлежащих отдельным агрегатам и педам, межагрегатному (межпедному) пространству, о порах, заполненных водой и воздухом. Эти первые физически обоснованные количественные характеристики порового пространства вошли в современные прогнозные математические модели (к сожалению, нередко и без ссылок на родоначальников!), оценивающие перенос веществ по макропорам и трещинам, так называемые “преимущественные потоки влаги и веществ”, что позволило рассчитывать и прогнозировать трансформацию удобрений в ландшафте, миграцию загрязняющих веществ (пестицидов, ядохимикатов и пр.), оценивать разнообразные риски. Представление российских

почвоведов о дифференциальной пористости почв позволило обосновать современные теории передвижения влаги и веществ, ставшие основой прогнозных и оценочных математических физически обоснованных моделей.

Практически одновременно с развитием представлений Дояренко и Качинского развивался и микроморфологический подход, позволяющий исследовать поровое пространство почв под микроскопом в различного рода срезах. Этот подход и соответствующие методы дали заметный толчок в развитии современного функционального почвоведения, так как позволили наблюдать не только объемную пористость почв и отдельных агрегатов, но также на качественном и количественном уровне анализировать форму пор, их ориентацию, взаимное расположение [4, 12, 21, 25, 27]. Более того, в ряде случаев предлагалось использовать данные по микроморфологии для оценки гидрологических характеристик почв [10, 11, 14, 31], что нередко давало обнадеживающие результаты в области гидрологии почв. Или даже приводило к введению новых почвенных понятий, таких как “архитектура порового пространства почв” [7].

Томография, как метод неразрушающего исследования внутренней структуры образцов в геологии, почвоведении, биологических науках начала применяться с конца XX в. Преимущества томографии для прямой характеристики порового пространства пород и почв были неоднократно подчеркнуты [2, 15, 24, 29]. В настоящее время с помощью макро- и микротомографии исследуют не только взаимосвязи почва–корневые системы, или твердая фаза почв – почвенные организмы, но также изучают различные динамические особенности формирования и изменения структуры почв и почвенных агрегатов [22, 28, 30]. Делаются попытки объединения классических физических измерений (анализа водоудерживающей способности и воздухопроницаемости почвы) и рентгеновской компьютерной томографии [20]. Опубликованы первые томографические исследования многофазных потоков в простых пористых средах (песчаниках) [19]. Безусловно, все эти исследования поровых структур, взаиморасположения и особенностей твердофазных почвенных компонентов в ненарушенных образцах были и остаются чрезвычайно перспективными для решения многих фундаментальных проблем почвоведения, а также для решения практических задач.

Цель работы: оценить путь развития томографического метода для прогноза наиболее перспективных направлений его использования как в теоретическом, так и практическом почвоведении.

Задачи: 1 – оценить этап качественного морфологического исследования порового пространства почвы с помощью томографии; 2 – рассмотреть структурно-функциональные количествен-

ные томографические характеристики порового пространства почв, оценить их новизну и актуальность; 3 – оценить возможности и ограничения томографических характеристик порового пространства почв в связи с современными физическими показателями почвенной пористости и 4 – обсудить практические целевые задачи, которые способна решать современная макро- и микротомография почвенных пор.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальной основой для данной статьи послужили проводимые в России макро- и микротомографические исследования последних лет. Объектами исследований являются дерново-подзолистые почвы европейской территории России (по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.) – Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic). Томографическое сканирование проводили на микротомографе SkyScan 1172 (Бельгия), установленном в ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, и на макротомографе геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленные эксперименты показали, что томографические исследования применимы для самых разных компонентов почвенного строения. Однако поровое пространство является наиболее доступным объектом томографического анализа. В отличие от твердофазных компонентов почвы, поры легко проницаемы для рентгеновских лучей, благодаря чему изображения порового пространства контрастно выделяются на фоне основной почвенной массы. Именно поровому пространству были посвящены первые томографические исследования почвы в 1980-х годах XX в. [13, 23].

Одним из результатов томографического анализа являются компьютерные трехмерные модели почвенных пор. Они обладают большой информативностью и генетической значимостью. Так, в двумерных микроморфологических шлифах из дерново-подзолистой почвы видно, что в гор. EL и BC имеется множество пор округлой формы (рис. 1А). Переход к объемным микротомографическим изображениям (рис. 1В) показал, что в гор. EL поры с округлыми срезами представляют собой изолированные пузырьки, а в гор. BC практически все поры с округлыми срезами являются современными или реликтовыми ходами корней [3].

Генезис везикулярной пористости в элювиальной толще почвы пока окончательно не ясен, хотя появление пузырьков можно объяснить современными процессами: сезонным биологическим выделением газа, перемещением газа в периоды

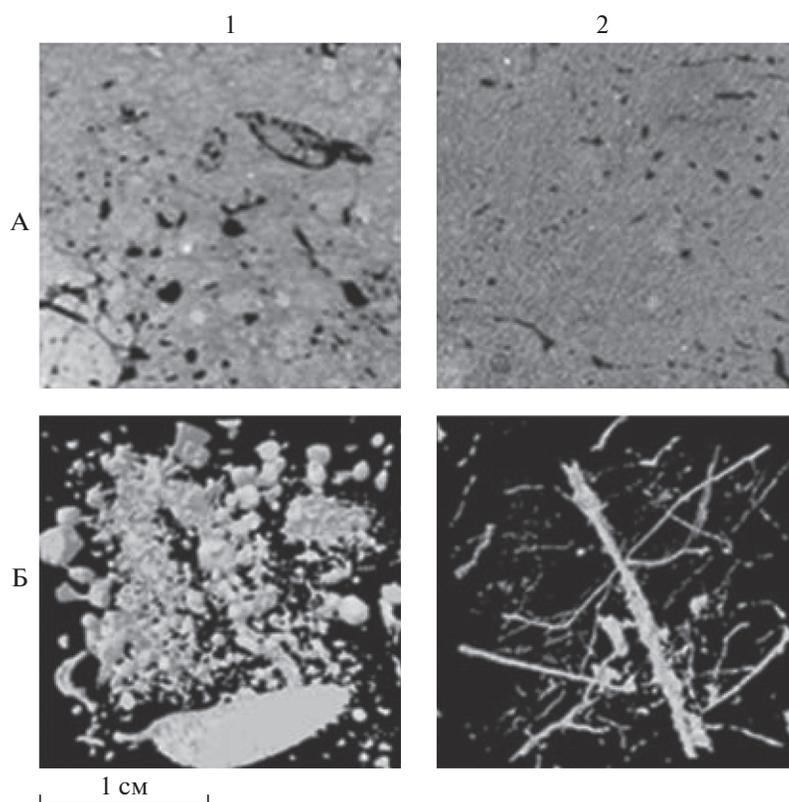


Рис. 1. Поревое пространство гор. EL (1) и BC (2) дерново-подзолистой почвы: А – микроморфологические шлифы (поры черные); Б – трехмерные микротомографические модели (поры светлые) [3].

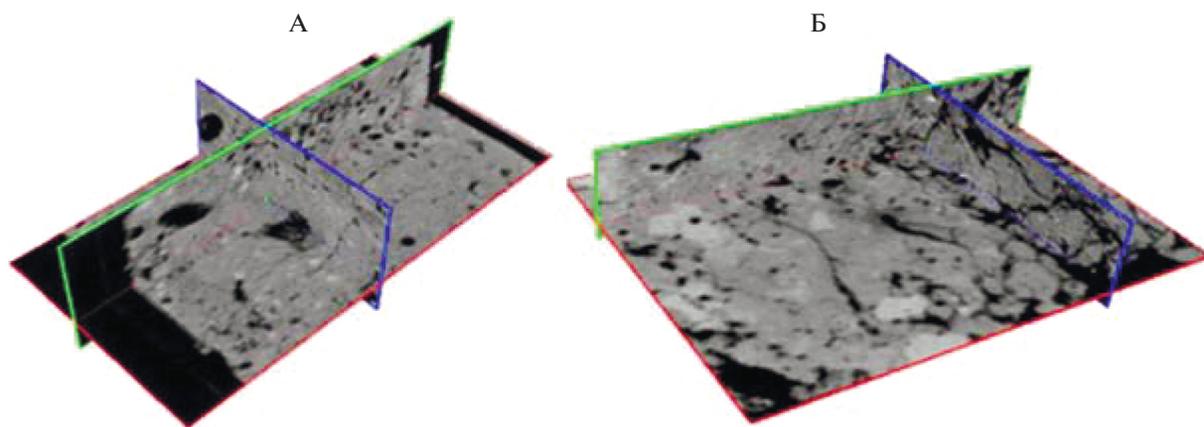


Рис. 2. Продольные и поперечные срезы через томографические реконструкции образцов из гор. EL дерново-подзолистой (А) и AEL серой лесной (Б) почв [2].

увлажнения почвы и при ее зимне-весеннем промерзании–оттаивании, другими физико-химическими процессами.

Помимо выразительных изображений томографический анализ позволяет получать специфические морфометрические данные об исследованных объектах (второй этап развития томографических исследований). Так, для почвенных

пор актуальны количественные характеристики их размеров, формы и ориентации в пространстве. Данные показатели измеряют в двумерных виртуальных срезах через томографическую компьютерную реконструкцию почвенного образца (рис. 2).

При морфометрическом анализе двумерных томографических срезов используют различные

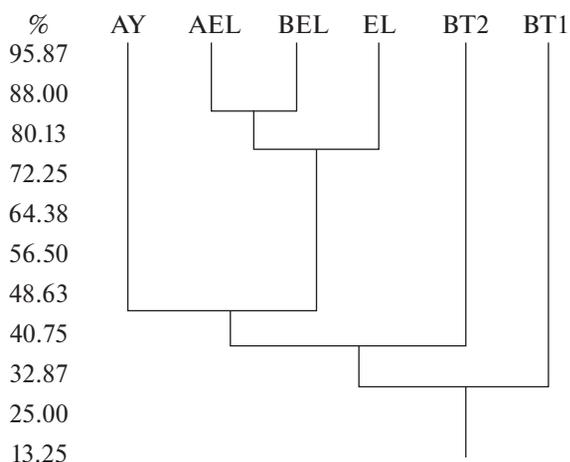


Рис. 3. Дендрограмма сходства генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы по форме порового пространства [5].

программы анализа плоских изображений и показатели, применяемые ранее для исследования пор в микроморфологических шлифах [4, 21, 25, 27]. К числу современных перспективных методов в этой области относится описание и реконструкция порового пространства почв с помощью корреляционных функций [1, 18].

Актуальными морфометрическими показателями являются общая площадь пор в поле зрения, габариты и площади отдельных пор, величины их периметров, показатели ориентации и формы пор в двумерном изображении. Информативность двумерного анализа формы пор в томографических реконструкциях весьма велика. Так, на рис. 3 показана дендрограмма сходства и различия основных генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы по форме межагрегатного порового пространства. Форму пор определяли по соотношению их площади, периметра, продольных и поперечных габаритов [4]. Кластерный анализ выявил высокий уровень сходства между горизонтами с признаками элювиирования: AEL, EL, BEL (около 80%). В то же время в профиле почвы имеются горизонты с низким уровнем сходства (<45%). Это гумусовый горизонт и текстурные гор. BT2 и BT1. Все горизонты, обладающие низким уровнем сходства, по форме пор имеют специфичную, отличную от других структуру: комковато-порошистую, ореховато-плитчатую, массивную (в пределах образца).

Помимо решения морфогенетических задач томографическая визуализация почвенных пор формирует новый подход к традиционному для почвоведения и гидрофизики анализу распределения объемов пор по их размерам. Распределение пор по размерам — это очень информативная, но, к сожалению, трудно получаемая характери-

стика [8]. В традиционном почвоведении и физике почв эта задача решается методом водной или ртутной порозиметрии, когда объем жидкости, содержащийся в порах соответствующего диаметра, может быть отнесен к капиллярной, и ее давление рассчитано по формуле Жюрена. Наличие томографических картин порового пространства предоставляет возможность напрямую получить распределение объемов пор по их диаметрам. Для этого в бинаризованном томографическом изображении с помощью различных программ измеряют площади (в 2D изображениях) или объемы (в 3D изображениях) томографически видимых пор различного размера.

Период количественных измерений порового пространства почв по томографическим данным выявил существенное несоответствие между традиционными и томографическими методами: общая пористость, рассчитанная по томограммам, имела заметно меньшие значения по сравнению с общей пористостью, рассчитанной по данным о плотности почвы и ее твердой фазы. В ряде случаев томографическая пористость оказывалась в 6–9 раз меньше пористости, определенной классическими методами. Указанные различия связаны, прежде всего, с тем, что томографический анализ имеет определенный нижний предел разрешения, величина которого зависит от размера образца и модели томографа. Как правило, чем крупнее исследованный образец, тем грубее разрешение томографического сканирования. Различные макротомографы имеют разрешение до 100–200 мкм/пиксель. В рентгеновских микротомографах высокого разрешения величина одного пикселя может составлять 0.6–0.8 мкм. Учитывая уровень разрешения томографической съемки при обсуждении пористости, определяемой по томограммам, следует говорить о “томографически видимой пористости” (ТВП) (при данном разрешении). В связи с этим представляется актуальным поиск единого метода обработки изображений, который потенциально мог бы охватить все необходимые масштабы анализа почвы в одном изображении. Так, недавно был протестирован новый способ математического слияния разномасштабных изображений, полученных с использованием разных устройств и при разных пространственных разрешениях [17]. Указанный способ открывает широкие перспективы мультимасштабного изучения почвы, однако пока он не получил широкого практического применения.

В наших исследованиях для сопоставления физических и томографических методов анализа физических пор использовали лабораторный микротомограф Bruker SkyScan 1172. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева). Рентгеновская трубка данного прибора имеет диапазон мощности: 40 – 130 кэВ, разрешение сканирования может изме-

няться от 0.6 до 50 мкм на пиксель. На этом приборе сканировали почвенные монолиты высотой 2.5 см и диаметром 3 см с энергией пучка 100 кэВ и разрешением 8.75 мкм на пиксел. При таких условиях сканирования количественному анализу доступны мезо- и макропоры $d > 30$ мкм. В полученных томографических реконструкциях измеряли распределение объемов томографически видимых пор по их диаметрам. Затем в тех же образцах определяли распределение пор по размерам методом ОГХ (водная порозиметрия). Наличие лимита разрешения приводит к несовпадению полученных эмпирических распределений объемов пор по их диаметрам (рис. 4). Основные различия наблюдаются в диапазоне пор $d < 30$ мкм, то есть в области, недоступной томографическому исследованию. При этом в области мезо- и макропор ($d > 30$ мкм), форма обоих распределений весьма сходна. Пик распределения в обоих случаях приходится на область тонких макропор ($d = 75-1000$ мкм), объем пор большего размера резко уменьшается. Судя по литературным данным, результаты ртутной порозиметрии также удовлетворительно совпадают с томографическими показателями в диапазоне мезо- и макропор [16, 26].

Можно заключить, что прямые томографические исследования порового пространства подтверждают соответствие классической физической капиллярной модели реальному распределению пор по размерам в диапазоне мезо- и макропористости. Однако пористость, рассчитанная по классической капиллярной модели, существенно больше пористости, определенной по томограммам, что вызывает необходимость дальнейших почвенно-гидрологических исследований, совмещенных с томографией более высокого разрешения.

Вполне естественным выглядит следующий шаг в использовании количественных данных томографического анализа — попытаться рассчитать из томографических данных количественные величины проницаемости почв, например, коэффициент фильтрации. Согласно теории фильтрации воды в почвах, эта характеристика движения воды в первую очередь должна быть связана с пористостью, распределением пор по размерам, с извилистостью пор. Попытки нахождения коэффициента фильтрации по традиционной пористости почвы уже осуществлялись [6], однако из-за трудностей количественной оценки извилистости порового пространства, наличия заземленных (тупиковых) пор, невозможности оценки связности пор в пористой системе почв, большинство этих попыток можно признать неудачными, точнее — практического воплощения эти попытки не получили.

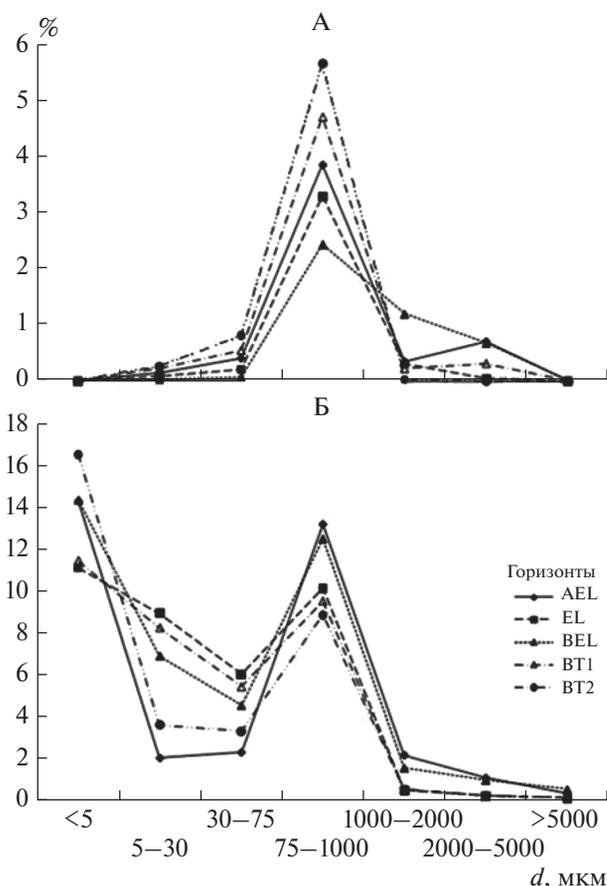


Рис. 4. Распределение объемов пор (% от общего объема пор) по размерам (диаметр d , мкм), полученные: А — томографическим методом (средние значения) и Б — методом водной порозиметрии (из ОГХ) [9].

На современном этапе (третий этап рассматриваемого периода томографических исследований) активно используется тот факт, что компьютерная томография изначально является количественным, численным методом. Фирменные программы построения и анализа томографических 3D-изображений позволяет рассчитывать, в частности, следующие характеристики пористых образцов: общую пористость; открытую пористость; закрытую пористость; связность пор; количество контактов и некоторые другие геометрические характеристики порового пространства.

Интересно установление взаимосвязи между томографически рассчитанными параметрами и практически важными гидрологическими свойствами почвы, прежде всего таким важным гидрологическим параметром, как коэффициент фильтрации. Однако и здесь возникают вопросы: 1 — насколько физические объяснимы указанные томографические параметры (что в физическом плане представляет собой открытая/закрытая пористость? аналогична ли она физически понятной проводящей/тупиковой пористости?); 2 — как, ка-

ким образом (линейным? нелинейным? прерывным? непрерывным?) указанные томографически полученные характеристики вносят вклад в кумулятивную величину коэффициента фильтрации?; 3 — безусловно, томографически определенные величины не являются строго постоянными, их величина зависит от объема образца, способа томографической реконструкции и сегментации. Как эти зависимости изучать и как их использовать (в виде какого параметра распределения: медианы, среднего, разброса?) и 4 — насколько представительны томографические изображения и томографические параметры порового пространства? Ведь томография предоставляет данные о поровом пространстве некоторого ограниченного почвенного монолита, который лишь в определенной мере отражает гидрологически важные пути, но явно не все, так как любой монолит “отсекает” значительную часть пор. В том числе отсекается часть пор с горизонтальной ориентировкой. А ведь почвенные потоки реализуются не только строго вертикально, но и в горизонтальном направлении. На это указывают и морфологические данные по разнообразным видам границ между горизонтами или слоями (карманная, языковатая, затечная, размытая, пыльчатая и др.), связанным с преимущественными путями миграции как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях.

Для ответа на эти и многие другие вопросы необходимы эксперименты, в которых на одних и тех же образцах определяются коэффициенты фильтрации и томографические характеристики порового пространства. Вероятно, только такие тщательно проведенные эксперименты позволят найти/отказаться от поиска связей коэффициента фильтрации с томографическими параметрами.

Понятно, что для сопоставления характеристик проницаемости почв (водопроницаемости, фильтрации) необходимо использовать более крупные образцы с ненарушенной структурой и томографы, способные исследовать поровое пространство в таких образцах. Поэтому в исследованиях структуры макропорового пространства использовался лабораторный макротомограф геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Исследования крупномерных цилиндрических монолитов ($h = 50$ см, $d = 10$ см) позволили получить новые макротомографические данные о строении твердой фазы и порового пространства постагрогенных дерново-подзолистых почв. Были созданы трехмерные компьютерные модели почвенных макропор $d > 1$ мм в 6 цилиндрических монолитах высотой 50 см и диаметром 10 см, отобранных с шагом 50–100 см. Показано, что исследованные монолиты характеризуются умеренной пространственной изменчивостью связности пор и умеренно-высокой пространственной изменчивостью величин общей томографической пористости, объема открытых и закрытых пор.

На примере данных монолитов исследована связь коэффициента фильтрации почвы (K_f , см/сут) и томографических показателей макропорового пространства в отдельных фрагментах профиля на глубинах 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 и 40–50 см (рис. 5). Установлено, что в целом по профилю наблюдается синхронное изменение K_f и объемов томографически видимых пор при разрешении 100 мкм/пиксель. Резкое уменьшение коэффициента фильтрации (со 100 до 20 см/сут) на глубине 10–20 см связано с наличием уплотненной “подошвы” в нижней части указанного слоя, четко регистрируемого по томографической пористости (рис. 6).

Весьма интересным представляется анализ соответствия K_f и томографически открытой и закрытой пористости. Из рис. 6 видно, что закрытая пористость не играет существенной роли в изменении коэффициента фильтрации. Значительную роль при пятикратном уменьшении коэффициента фильтрации на этой глубине играют именно открытая пористость и связность пор.

Естественно возникает вопрос о том, как же проходит фильтрация в такой сложной единой системе при 4–7-кратном уменьшении объема открытых пор и связности пор? Или в системе будет наблюдаться естественный застой влаги на этой границе снижения открытой пористости и связности порового пространства? Эти вопросы требуют дополнительных экспериментальных исследований. Безусловно, при изучении крупномасштабных объектов (как монолита в приведенном выше примере) желательно использовать макротомографы с высокой мощностью и большой разрешающей способностью. Применение таких томографов может решить проблему увеличения размеров образца (и повышения его репрезентативности) без ущерба для детальности исследования.

Отметим, что с помощью томографии можно измерить объемы пор определенного диаметра (радиуса). А это означает, что мы имеем возможность оценить содержание капиллярной воды в капиллярах, отвечающих за формирование полевой (наименьшей) влагоемкости. То есть появляется возможность по томографическим исследованиям определить водоудерживающие (или вододепозитарные) свойства почв. Это совершенно новый аспект гидрологических исследований, позволяющий оценить современное состояние теории равновесных почвенно-гидрологических констант, их физическое объяснение с помощью томографических исследований структуры порового пространства почв.

И не только гидрологических равновесных и проводящих свойств, но и таких традиционно важных характеристик почв, как водоустойчивость. В хорошо агрегированной почве томографическая съемка и последующие расчеты могут

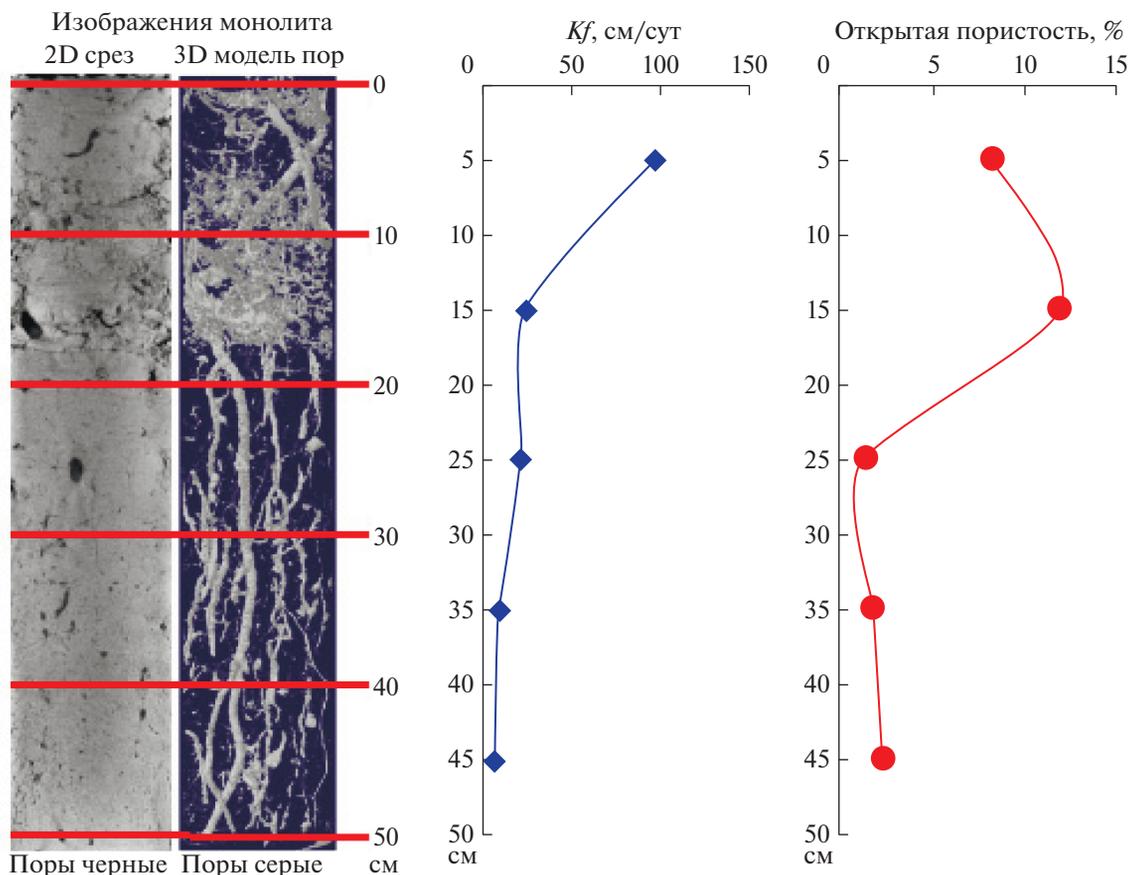


Рис. 5. Профильные изменения коэффициента фильтрации почвы (K_f) и открытой томографической пористости. Разрешение 100 мкм/пиксель.

количественно охарактеризовать контакты твердофазных объектов, определить количество контактов в единице объема, установить площадь поверхности открытых пор. Эти параметры (в особенности количество контактов) должны дать представление о водоустойчивости почвенных объектов, поскольку количество контактов и их качество оказывают непосредственное влияние на водоустойчивость. Ближайшие исследования либо подтвердят это теоретическое положение почвенной реологии и позволят по томографии изучать водоустойчивость почв, либо внесут но-

вые знания в понимание природы ряда физических почвенных явлений, таких как водоустойчивость, механическая прочность и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В томографических исследованиях почвенных пор можно выделить 3 этапа: 1 – качественного изучения порового пространства, его структуры и архитектуры в связи с генезисом почв, 2 – использования томографических изображений для количественного изучения порового пространства (распределения пор размерам, форме, ориентации; сопоставления данных томографии и ОГХ в капиллярной области) и 3 – математического анализа, возможностей применения и практического приложения оригинальных томографических параметров. На современном (третьем) этапе на первый план выходят вопросы соответствия физических структурно-функциональных параметров почвы параметрам томографических расчетов и, соответственно, изучения возможностей томографической реконструкции важнейших в теоретическом и практическом аспектах гидрофизических свойств почв, таких как коэффици-

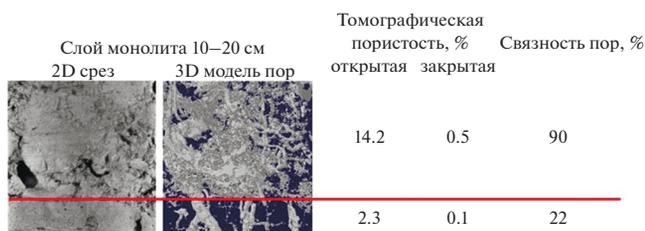


Рис. 6. Дифференциация порового пространства в слое 10–20 см исследованного монолита.

ент фильтрации, основная гидрофизическая характеристика и др. При этом необходимо сознавать, что томографические данные о поровом пространстве относятся к некоторому ограниченному объему почвенного монолита, который лишь в определенной мере представляет гидрологически важные пути, но явно не все, так как любой монолит “отсекает” часть горизонтальных пор. В этом случае, как и во многих других почвенных исследованиях, встает проблема представительности томографических изображений.

Следует заключить, что перспективы томографии как физически обоснованного исследования порового пространства почвы, его объемов, структуры и архитектуры весьма обширны. В частности, можно оценить, в какой степени почвенные депозитарные и проводящие функции определяются параметрами порового пространства и какие именно параметры пор играют при этом определяющую роль. Можно быть уверенным, что такого рода исследования предоставят новые знания о роли томографии в разного рода исследованиях, а также о традиционных почвенно-физических и гидрологических характеристиках и константах.

Благодарность. Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герке К.М., Карсанина М.В., Скворцова Е.Б. Описание и реконструкция строения порового пространства почвы с помощью корреляционных функций // Почвоведение. 2012. № 9. С. 962–973.
2. 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.
3. Скворцова Е.Б., Герке К.М., Корост Д.В., Абросимов К.Н. Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (Анализ 2D и 3D изображений) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 65–79.
4. Скворцова Е.Б., Морозов Д.П. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49–56.
5. 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.
6. Судницын И.И. Закономерности передвижения почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 136 с.
7. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 268 с.
8. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
9. Шейн Е.В., Скворцова Е.Б., Дембовецкий А.В., Абросимов К.Н., Ильин Л.И., Шнырев Н.А. Распределение пор по размерам в суглинистых почвах: сравнение микротомографического и капилляриметрического методов определения // Почвоведение. 2016. № 3. С. 344–354.
10. Bouma J., Jongerius A., Boersma O., Jager A., Schoonderbeek D. The function of different types of macropore during saturated flow through four swelling soil horizons // Soil Sci. Soc. Am. J. 1977. V. 41. P. 945–950.
11. Bouma J., Jongerius A., Schoonderbeek D. Calculation of hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data // Soil Sci. Soc. Am. J. 1979. V. 43. P. 261–264.
12. Carnicelli S., Ferrari G.A., Pagliani M. Pore space degradation in Zimbabwean crusting soils // Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology (Australia, July 1992). Amsterdam, 1994. P. 677–686.
13. Crestana S., Cesareo R., Mascarenhas S. Using a computed tomography miniscanner in soil science // Soil Sci. 1986. V. 142. P. 56–61.
14. Hallaire V., Curmi P. Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement // Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology. Townsville, Australia, July, 1992. Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam, 1994. P. 559–567.
15. Helliwell J., Sturrock C., Grayling K.M., Tracy S.R., Flavel R.J., Young I.M., Whalley W.R., Mooney S. Applications of x-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review // European J. Soil Sci. 2013. V. 64(3). P. 279–297. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12028>:1-19.
16. Jin J. H., Kim J., Lee J.-Y., Oh Y.M. Correlative multiple porosities for reservoir sandstones with adoption of a new reference-sample-guided computed-tomographic method // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 30250. doi 10.1038/srep30250
17. Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Ivanov A.L., Mallants D. Enhancing image resolution of soils by stochastic multiscale image fusion // Geoderma. 2018. V. 314. P. 138–145. doi 10.1016/j.geoderma.2017.10.055
18. Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Mallants D. Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure // PLoS ONE. 2015. V. 10(5). P. e0126515. doi 10.1371/journal.pone.0126515
19. Leu L., Berg S., Enzmann F., Armstrong R.T., Kersten M. Fast X-ray micro-tomography of multiphase flow in Berea sandstone: a sensitivity study on image processing transport in porous media // Transp Porous Med. 2014. V. 105. P. 451–469. doi 10.1007/s11242-014-0378-4
20. Naveed M., Moldrup P., Arthur E., Wildenschild D., Eden M., Lamand M. et al. Revealing soil structure and

- functional macroporosity along a clay gradient using x-ray computed tomography // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2013. V. 77(2). P. 403–411. doi 10.2136/sssaj2012.0134
21. *Pagliai M.* Soil porosity aspects // *Int. Agrophys.* 1988. V. 4. № 3. P. 215–232.
 22. *Peth S.* Applications of microtomography in soils and sediments // *Synchrotron-Based Techniques in Soils and Sediments.* 2010. V. 34. P. 73–101.
 23. *Petrovic A.M., Siebert J.E., Rieke P.E.* Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1982. V. 46. P. 445–450.
 24. *Pires L.F., Borges J.A.R., Bacchi O.O.S., Reichardt K.* Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of Brazilian contribution // *Soil and Tillage Research.* 2010. V. 110. P. 197–210.
 25. *Protz R., Shipitalo M.J., Mermut A.R., Fox C.A.* Image Analysis of Soil – Present and Future // *Geoderma.* 1987. V. 40. P. 115–125.
 26. *Rigby S.P., Chigada P.I., Wang J., Wilkinson S.K., Bateman H., Al-Duri B., Wood J., Bakalis S., Miri T.* Improving the interpretation of mercury porosimetry data using computerised X-ray tomography and mean-field DFT // *Chemical Engineering Science.* 2011. V. 66(11). P. 2328–2339. doi 10.1016/j.ces.2011.02.031
 27. *Ringrose-Voase A.J., Bullock P.* The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs // *J. Soil Sci.* 1984. V. 35. P. 673–684.
 28. *Taina I.A., Heck R.J., Deen W., Ma E.Y.T.* Quantification of freeze–thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computed tomography // *Can. J. Soil Sci.* 2013. V. 93. P. 533–553.
 29. *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. P. 1–19.
 30. *Torrance J.K., Elliot T., Martin R., Heck R.J.* X-ray computed tomography of frozen soil // *Cold regions science and technology.* 2008. V. 53. P. 75–82.
 31. *Vogel H.J., Babel V.* Experimental relationship between the morphological pore-size distribution and the soil water-retention characteristic // *Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology.* Townsville, Australia, July, 1992. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam, 1994. P. 591–600.

Tomography of the Soil Pores: from Morphological Characteristics to Structure-Functional Assessment of Pore Space

A. L. Ivanov^a, E. V. Shein^{a, b, *}, and E. B. Skvortsova^a

^a*Dokuchaev Soil Science Institute, Russia, 119017, Moscow, Pyzhevsky lane 7, build. 2*

^b*Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory*

*e-mail: evgeny.shein@gmail.com

The development of tomographic studies of soil pore space in Russian soil science in 2011–2018 is discussed. In several years, these studies have evolved from the qualitative description of pores in some soils from the European part of Russia to the quantitative functional assessment of soil pore space on the bases of 3D tomographic models. Three stages of tomographic studies of soil pores can be distinguished: (1) qualitative analysis of pore space as a spatial-geometric characteristic of soil structure and as a component of the general analysis of soil morphology; (2) the obtaining of quantitative morphometric data on the shape, size, and orientation of soil pores and combined analysis of these tomographic data and data on the physical soil properties; and (3) the use of calculated tomographic parameters in the study of hydrological and physicochemical properties of soils important for both theoretical and applied aspects of soil science. In recent years, the research has been focused on the assessment of the relationships between tomographic parameters of soil pore space and traditional soil hydrological constants, possibility of calculating the water retention curve and water conductivity function from the tomographic parameters of soil pore space, and on the quantitative assessment and prediction of soil degradation on the basis of tomographic data. The solution to these problems will make it possible to explain the physical phenomena controlling soil hydrological characteristics and to substantiate the use of tomographic data in applied soil science, soil hydrology, and agrophysics.

Keywords: morphology, micromorphology, micromorphometrics, 3D models of pores, hydrological properties, soil functions