

## ТОМОГРАФИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ

УДК 631.42

### ТОМОГРАФИЯ В ПОЧВОВЕДЕНИИ: ОТ ПЕРВЫХ ОПЫТОВ К СОВРЕМЕННЫМ МЕТОДАМ (ОБЗОР)

© 2021 г. К. Н. Абросимов<sup>а, \*</sup>, К. М. Герке<sup>б</sup>, Д. С. Фомин<sup>а</sup>, К. А. Романенко<sup>а</sup>, Д. В. Корост<sup>а, с</sup>

<sup>а</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 119991 Россия

<sup>с</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: abrosimov\_kn@esoil.ru

Поступила в редакцию 04.02.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Представлен обзор использования метода компьютерной томографии в исследовании почв с первых работ до настоящего времени. Проанализировано развитие метода компьютерной томографии в области аппаратного обеспечения и способов обработки томографических данных от первых попыток анализа структуры почв по томографическим срезам низкого качества до современных методов сегментации и анализа объемных структур с использованием специализированного программного обеспечения, корреляционных функций и нейросетей. Показаны возможности применения и определены тенденции развития методов обработки томографических данных в области изучения и анализа структуры почв. Приведены примеры из мирового опыта использования компьютерной томографии для почв, показаны различные способы сегментации данных, применявшиеся с первых исследований до настоящего времени. Представлена специфическая терминология, сложившаяся в рамках развития метода и различные морфометрические показатели для 2D и 3D изображений, разработанные или разрабатываемые в данный момент, дан прогноз развития метода на ближайшую перспективу.

*Ключевые слова:* компьютерная томография, анализ изображений, поровое пространство, структура почвы, макротомография, mCT, ХСТ

DOI: 10.31857/S0032180X21090021

#### ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная томография — не самый новый, но активно развивающийся метод в почвоведении. С момента своего появления до начала XXI в. почвоведомы метод был слабо востребован. В основном опубликованные исследования ограничивались томографической съемкой крупных образцов цилиндрической формы — “монолитов”. С помощью метода изучалась плотность сложения почв [69], структура крупных пор зоогенного происхождения [13, 46], содержание воды [5, 17] и пространственное распределение влажности в почве [6].

Физической основой метода является экспоненциальный закон ослабления излучения. В рентгеновском диапазоне излучения экспоненциальный закон выполняется с высокой степенью точности, поэтому разработанные математические алгоритмы были впервые применены именно для рентгеновской компьютерной томографии. В 1963 г. американский физик А. Кормак решил задачу томографического восстановления изображений [16], а в 1969 г. английский инженер-физик Г. Хаунсфилд из фирмы EMI Ltd. сконструировал ЭМИ-сканер [42] — первый компьютерный рентгеновский томограф, клинические испытания которого прошли в 1971 г.

Переориентация производителей компьютеров на частного пользователя, повсеместное распространение персональных компьютеров и рост их производительности, развитие микроэлектроники под индустрию развлечений — все это оказало положительное влияние на развитие множества отраслей, в том числе позволило наладить массовое производство рентгеновских томографов совершенно нового типа — небольшого размера, конструктивно простых и позволяющих исследовать микростроение небольших объектов с высоким разрешением. 3D анализ структур стал доступным практически любому. Повлияло это и на возможности исследования структуры почв.

В первых томографических исследованиях [17, 69] была возможность рассмотреть в объеме образца почвы только крупные объекты или макро-

поры. Развитие технологической базы позволило перейти на иной уровень точности исследования — стало доступным изучение почв в объеме на мезо-, микро- и наноуровнях. Параллельное развитие методов анализа изображения позволило определить наиболее удобные алгоритмы сегментации рентген-контрастных фаз и разработать программы расчета объемных показателей на основе сегментированных данных. Во многом автоматические алгоритмы несовершенны. Автоматическая сегментация до сих пор не отличается надежностью [4] и применяется ограниченно. Пока отсутствует возможность классификации объектов одной фазы по генезису (например, разделение порового пространства на поры-каналы и трещины), но есть возможность разделения по форме и ориентации в пространстве.

Аппаратные и математические возможности томографии, а также задачи исследования почв (анализ внутренней структуры и различных природных процессов, рост и развитие корневой системы, уплотнение, изменения при внесении удобрений и др.) сформировали облик современного томографического исследования почв, а также способы томографического исследования. В современном томографическом исследовании почву можно изучать сразу несколькими способами:

**1. В монолитах.** Монолит для томографического исследования несколько отличается от привычного для почвоведов вида. Это почва, отобранная в рентген-прозрачную трубу (ПВХ-труба) цилиндрической формы диаметром от 5 до 20 см и высотой до 1 м. Такая форма образца применяется для исследований самой разной практической направленности: изучения макропористости в почвах [70], развития корневых систем [63] или зоогенных пор [13, 14], изменений в структуре почвы и порового пространства при внесении минеральных удобрений [107], изучения деградации и уплотнения почв [35], влияния различных факторов в почве на коэффициент поглощения рентгеновского излучения [97]. С 80-х годов до настоящего времени таким способом исследуют структуру почв с низким разрешением. Причина тому — используемое оборудование. В мире не существует специализированных томографов для исследования почв. Большая часть исследований проводится на медицинском (различные модели Siemens — Somatom 64, Plus, 512CR, Philips Tomoscan и др.), промышленном (SMS Model 101B+ CITA) или геологическом (отечественный РКТ-180 и его зарубежные аналоги) оборудовании, где разрешение подробнее 70 мкм практически нигде не предусмотрено. Но в начале 2010 гг. стали появляться микротомографы, позволяющие снимать фрагмент монолита диаметром 10 см и высотой 15–20 см с разрешением около 10 мкм (Bruker SkyScan 1073, 1273, 2211, 2214, близкие к ним по параметрам модели Nikon и GE), что открывает

новые возможности для изучения структуры почв и порового пространства на макро- и мезоуровне.

**2. В микромонолитах.** Термин “микромонолит” используется только в российском почвоведении [4, 32] и более нигде, но образцы почвы сопоставимой формы и размера с небольшими отличиями исследуют повсеместно. Микромонолит — образец почвы цилиндрической формы, упакованный в пластиковый рентген-прозрачный цилиндр. По форме — уменьшенная версия монолита до диаметра 1–3 см и высотой до 5 см. В задачи исследования почв в такой форме входит все то же, что для монолитов. Но там, где требуется подробное разрешение, позволяющее анализировать структуру на мезо- или микроуровнях. Так, микромонолиты используют для поэтапного исследования развития корневой системы [51, 63, 95], отслеживания структурных изменений при набухании—усадке [91, 92] и замерзании—оттаивании [39, 83, 99], антропогенном уплотнении почв и в других исследованиях [7, 9, 35, 53, 55, 73, 74, 84, 90]. Разрешение томографической съемки для микромонолитов немного различно в зависимости от используемого оборудования (томографа) и диаметра микромонолита и может меняться в пределах от 1 до 30 мкм. Микромонолит можно снимать и на медицинских томографах, но образцы такого размера не будут репрезентативными, так как большинство микродеталей просто потеряется из-за грубого разрешения.

**3. В агрегатах.** Почвенный агрегат, он же — естественная сложная почвенная отдельность, образованная из микроагрегатов или элементарных почвенных частиц [3] — очень удобный объект для исследования методом компьютерной микротомографии. Для большинства агрегатов характерно низкое поглощение рентгеновского излучения и габаритные размеры, удобные для томографического исследования в диапазоне 1–4 мкм. В агрегатах фракционного размера 3–5 мм и менее исследование внутренней структуры и внутриагрегатной пористости затруднительно или вообще невозможно традиционными методами микроморфологии (шлиф, аншлиф). Современные микротомографы позволяют изучать структуру отдельных агрегатов фракционного размера до 500 мкм с разрешением 750 (Bruker SkyScan 1172) или 60 нм (Bruker SkyScan 2214). В перспективе кроме исследования микропористости почв [94] возможен переход на уровень нанопористости микроагрегатов путем совмещения данных томографии и электронной микроскопии. Первые работы в этом направлении уже ведутся [31].

Главное достоинство метода компьютерной томографии — не повреждающий способ исследования с точным воссозданием объемной структуры, состоящей из видимых в рентгеновском излучении контрастных фаз — твердой фа-

зы почвы, порового пространства и органических объектов (корни, органические остатки и др.). Преимуществами томографии по сравнению с традиционными морфологическими и микроморфологическими методами являются: 1) высокая скорость получения результатов, в том числе возможность проводить точный трехмерный мониторинг изменения строения почвы, влажности и других параметров с высоким разрешением (до 1 мкм и меньше), 2) неинвазивность (исследование происходит без изменения строения и свойств образца) [32]. При помощи томографической съемки можно исследовать образцы почв при различной влажности – от полностью водонасыщенных до сухих, при различной температуре в том числе в мерзлом состоянии [83, 92]. Это дает возможность поэтапного исследования динамики изменений структуры (микроструктуры) порового пространства почв.

Помимо способов и разновидностей томографии почв интерес представляет развитие методов получения и обработки томографических данных. Если 2D анализ остался фактически неизменным с 1980-х годов и в таком виде применяется для анализа томографических срезов [9, 93], то 3D анализ развивается весьма интенсивно.

Недостатки и ограничения метода не кажутся явными, но они существенны: 1 – объем томографических данных зависит от размеров образца и разрешения; 2 – наблюдаются пересечения рентген-контрастных фаз различных минералов в градациях серого (другое название – проблема частичного заполнения пикселя/вокселя). Это усложняет идентификацию отдельных минеральных фаз в образце, но может быть решено сопоставлением шлифов и томографических срезов; 3 – в процессе исследования необходимо вмешательство человека на этапах сегментации фаз и программной обработке (фильтрации) томографических изображений; 4 – несовершенство методов анализа объемных структур в почве. Критерии оценки состояния почв на разных уровнях структурной организации находятся только на этапе проработки, как и некоторые объемные показатели, по которым эти почвы предполагается оценивать. Следует отметить, что большинство перечисленных недостатков не носят фундаментальный характер проблемы, заложенной в сам метод, и со временем могут быть сведены к минимуму или устранены.

#### МАКРОТОМОГРАФИЯ ПОЧВ. ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ. 1980–2000 гг.

**Возможности и ограничения макротомографии почв.** Первые годы развития томографии – это сплошные исследования почв на макроуровне. Приоритетным направлением развития томографии всегда были различные медицинские исследова-

ния, именно с использованием медицинского оборудования первые исследования и проводились. Большая часть работ 80–90-х гг. выполнена на медицинском оборудовании Siemens или его аналогах [5, 6, 13, 69]. Используемое оборудование определило и форму образца – объекта исследования – в виде цилиндра ненарушенной почвы различной высоты. Образцы почв крупные, диаметром 10–20 см, разрешение съемки от 100 мкм и грубее.

Но медициной развитие томографических методов не ограничилось, быстро стало ясно что томограф – хорошее устройство для контроля качества промышленными изделиями на предмет наличия скрытых дефектов. Стали появляться мощные инженерные устройства-дефектоскопы для производств и анализаторы геологических кернов, схожие по размерам исследуемого образца и мощности рентгеновского источника. Устройства для исследования структуры на микроуровне только разрабатывались, как и программное обеспечение для них.

С момента запуска первого рентгеновского томографа до публикации одной из первых известных работ по томографии почв прошло 10 лет. В 1982 г. была опубликована работа [69], где по томографическим данным авторы определяли плотность почвы. Для оценки размеров пор был использован планшет с отверстиями разного диаметра (как эталонный стандарт размеров), отснятый на томографе вместе с образцом. Подобный способ на несовершенном оборудовании позволял получать данные более качественные, чем РЭМ (растровый электронный микроскоп), но при этом РЭМ и томографию уже в 1980-е годы предлагалось использовать совместно, как методы, дополняющие друг друга [88].

В некотором роде идея компьютерной томографии опередила свое время. Томография появилась почти на 15 лет раньше массового распространения персональных компьютеров IBM и стремительного развития технологий компьютерных процессоров, упростивших работы с томографическими данными. Возможность оцифровки внутренней объемной структуры объекта исследования с последующим разделением на рентген-контрастные фазы (например, почва, поровое пространство, минеральные включения или конкреции и органическое вещество) – это основа для исследования любой объемной структуры как физического объекта не повреждающим методом. Но та же реконструкция томографических срезов из теневых проекций (результат томографической съемки) – процесс, требующий высокопроизводительного компьютерного оборудования. И это только первый этап, сегментация (разделение объекта на рентген-контрастные фазы по градациям серого) и расчеты объемных по-

казателей так же требовательны к вычислительной технике и объемам дисковой памяти. В итоге на этих этапах получается большой объем данных, возможности работы с которым ограничены даже современным уровнем развития компьютерной техники.

Недоступность (высокая стоимость, малая распространенность) вычислительных мощностей для реконструкции срезов, сегментации фаз и расчетов объемных показателей была серьезной проблемой на раннем этапе развития томографии. На оборудовании 1980-х гг. (ЭВМ Искра-226) реконструкция 1 среза занимала до 7 мин [88]. При этом еще существовали проблемы хранения, обработки и вывода данных.

Для расчетов используемых сейчас объемных показателей применяется специализированное программное обеспечение, не всегда доступное исследователям и в наше время, и которого просто не существовало в 1980-е годы. Альтернативой объему по скорости обработки и расчетов был анализ отдельных срезов с набором статистических данных. То есть то, что сейчас называется анализом 2D изображений.

Макротомография почв используется и сейчас для самых разных задач [9, 13, 59].

**2D анализ томографических срезов и идея кластерного анализа.** Анализ цифровых изображений зародился даже раньше томографии. Первые автоматические алгоритмы сегментации разработаны в 1970-е гг. [67] и их используют до сих пор для работы с томографическими данными, при том, что их использование в томографии почв не всегда гарантирует точный результат [4]. Изначально 2D анализ применялся для работы с РЭМ изображениями. Оттуда же перешли в томографию общепринятые характеристики: пористость, распределение пор по размерам, средний размер, площадь, периметр и коэффициент формы одной поры, анизотропия структуры и др. [88]

Тогда же появилось понятие “томографическая пористость” – пористость, ограниченная разрешением томографической съемки.

Требования к исследованиям микростроения почв определяют необходимость получения не только качественных, но и количественных характеристик объектов исследования. Одним из эффективных способов оказалось распределение пор в вертикальных срезах почвы, исходя из их ориентации и формы. Некоторые варианты кластерного анализа пор, разработанные еще для шлифов [85], нашли применение и при анализе томографических данных [2].

Для количественной оценки часто использовался показатель “*фактор формы*”, иногда в сочетании с ориентацией пор. Фактор формы пор позволяет дать количественную оценку порового пространства почв на разных иерархических уровнях.

Существуют множество вариантов оценки формы пор в 2D, наиболее часто встречаемые в исследовательских работах варианты:

А. Фактор формы ( $F$ ), предложенный Скворцовой [1] для анализа сканированных изображений шлифов. Этот показатель имеет определенные преимущества при характеристике формы пор в шлифах или томографических срезах и позволяет различать макропоры от трещиновидных до округлых. В ряде публикаций [1, 82] этот метод использован совместно с системой кластерного анализа [85]. Анализ по Скворцовой эффективно использовался для валидации качества стохастических реконструкций почв [49]. Недавно была предложена улучшения классификация, позволяющая различать все типы пор за счет добавления в уравнение параметра выпуклости [62].

Б. Иные формы форм-фактора пор ( $FF$ ). Например, применяемый в аналитической программе STan (фирменное ПО Bruker для обработки томографических данных) изначально сделан как универсальный инструмент для контрастных объектов, но также может быть использован для исследования почв [13].

Анализ почвенных пор в двумерных срезах имеет существенные методические ограничения и недостаточен для исследования анизотричного порового пространства [1]. В почве в горизонтальных и вертикальных срезах можно получить диаметрально противоположные результаты. Очевидно, что фактор формы Скворцовой может быть расширен и для анализа 3D изображений почв, хотя до настоящего времени таких попыток не предпринималось.

#### СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ МЕТОДА. 2000 г. – НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ. ПОВСЕМЕСТНЫЙ ПЕРЕХОД К АНАЛИЗУ 3D СТРУКТУР В ПОЧВЕ

**Развитие и возможности современного томографического оборудования.** В конце 90-х годов XX в. произошли события, далекие от почвоведения, но повлиявшие на развитие томографии как метода – началось массовое производство светочувствительных ПЗС(СDD)-матриц (аналоговых интегральных микросхем, состоящих из светочувствительных фотодиодов) высокого разрешения, используемых в цифровой фото- и видеотехнике. На их основе несколько позже стали выпускать X-ray камеры, нашедшие свое применение в томографии. Это привело к появлению недорогих микротомографов типа модели SkyScan 1072 и 1074, разрешение съемки которых было в 5–10 раз подробнее медицинского оборудования, но при этом сильно уменьшился размер образца (в сечении до 1–3 см). В томографы этих моделей просто физически невозможно было поставить образец

крупнее этих габаритов. Модели томографов фирмы GE (General Electric) сохранили возможность установки крупных образцов, но при этом источник излучения там в большинстве случаев просто недостаточно мощный, чтобы пробить образец почвы диаметром крупнее 6–7 см. Особенность конструкции микротомографа четвертого поколения диктует правило — чем меньше образец — тем подробнее разрешение для съемки образца целиком. И так до предела разрешения, которое в современных моделях типа Bruker Skyscan 2214 составляет уже 60 нм. К сожалению, невозможно снять на томографе монолит диаметров 10 см с разрешением 60 нм, но отдельный агрегат фракции 0,5–1 мм вполне позволит переход на субмикронный масштаб, что, например, даст возможность оценить изменения микроструктуры почв при длительном использовании минеральных удобрений. Технологически сконструировать томограф, снимающий крупные образцы с наноразрешением можно, но возникнет та же проблема что и 30–40 лет назад. Гигантский объем данных в теневых проекциях (сотни терабайт информации) [31], с обработкой которого справится только система типа суперкомпьютера или крупного корпоративного сервера, специально настроенного на решение подобных задач. К современным задачам томографии в почвоведении можно отнести разработку показателей, оценивающих функциональное состояние почв. Для этого требуется изучение структуры и микроструктуры твердой фазы и порового пространства почв, отработка уже существующих оценочных показателей (например, связности пор), разработка и опробование новых математических и технических методов.

**Микротомография в исследовании структуры и порового пространства агрегатов.** Появление нового оборудования повлияло на томографию почв. Стало возможным исследовать микроструктуру агрегатов различных почв фракционного размера от 250 мкм и крупнее. Помимо оборудования появилось и новое программное обеспечение. В программе Bruker CTan есть режим оконтуривания объекта с возможностью отсекающих внутренних пор (ROI shrink warp), выходящих на поверхность образца по заданному порогу. Это дает возможность сделать 3D анализ внутренней структуры агрегата почв в 100% объеме. Стало возможным объемное распределение любых структурных элементов рентген-контрастных фаз.

Альтернативы компьютерной томографии при изучении микроструктуры агрегатов на данный момент нет. Если агрегаты крупных фракций (7–10 мм и крупнее) еще можно изучать традиционными методами микроморфологии, то сделать шлифы из более мелких просто невозможно. Толщина шлифа неравномерна и при хорошей ручной работе составляет около 30 мкм. Но при раз-

решении съемки 3 мкм это 10–11 томографических срезов, образующие свой объем, в котором почти наверняка будут замкнутые микропоры. Благодаря оконтуриванию и высокому разрешению результаты сканирования шлифа и томографической съемки агрегата можно совместить с высокой точностью (1–2 мкм) вручную, что позволит кроме морфометрических показателей на основе анализа томографических данных получить еще и минеральный состав на основе анализа шлифа (или аншлифа).

Томографических исследований микроструктуры агрегатов не так много, как исследований почвы на макроуровне, но они есть и среди них попадаются необычные работы. Так, с помощью микротомографии агрегатов чернозема представлены дополнительные диагностические признаки негативных процессов почвенного осолонцевания: низкие значения видимой на томографических изображениях открытой пористости агрегатов и заполнение существенной части внутрипедных пор подвижным веществом (определено по дополнительным исследованиям) и слитогенеза: большое количество видимых на томограммах внутриагрегатных тонких пор и почти отсутствие гумусово-глинистой плазмы во внутрипедной зоне [94]. Помимо этого, с помощью микротомографии изучена скорость разложения органического вещества и ее взаимосвязь с открытыми порами [53]. Также опубликован опыт морфологического описания внутриагрегатного порового пространства [87].

Интересными могут стать результаты сдавливания (механической нагрузки на агрегаты). Компьютерная томография позволяет визуализировать происходящие изменения в микроструктуре почвы и зафиксировать нагрузку, при которой изменения произошли. Нагрузка на агрегат производится в специальном сдавливающем столике (дополнительном модуле) к томографу. При использовании сдавливающего столика отображаются графики нагрузки–деформации. На графиках фиксируется пиковая нагрузка при которой возникают трещины в агрегате (рис. 1).

**Поровое пространство и сегментация пор по их генезу.** Поровое пространство почв — сложноорганизованная динамичная структура, состоящая из пор различного происхождения и разной формы. Просто сегментация объемной структуры порового пространства — это фактически визуализация общей пористости (Total porosity) исследуемого объекта. Динамика общей пористости в образцах любого объема может использоваться как диагностический показатель [9], но отдельно представляет небольшой интерес. Для оценки качественного состояния почв и их функций гораздо информативнее показатели связности порового пространства, фильтрационные модели для во-

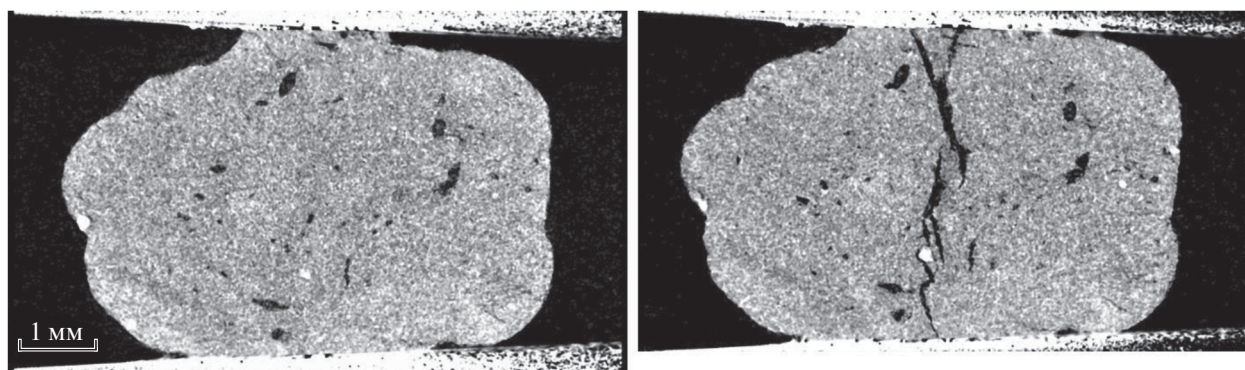


Рис. 1. Сухой агрегат дерново-подзолистой (Albic Retisol) почвы до нагружения и при нагрузке 600 г. Съемка К.А. Романенко.

ды или воздуха, распределение пор по размерам в объемной структуре. Все это можно сделать на основе уже разработанного программного обеспечения (Image-J, ParaView, Avizo и др.). Но если не учитывать органическое вещество в почве, все эти модели будут неработоспособны. Даже если корни в порах-каналах хорошо видны, отделить поровое пространство фитогенного происхождения от остальных пор еще недавно было фактически невозможно.

Визуализация объемной структуры порового пространства показывает, как различные характерные поры или типы пор формируют общую архитектуру порового пространства почвы [68] и составляют иерархию пор разного размера и происхождения [22, 23]. Поры можно разделить на текстурные поры, определяемые расположением первичных частиц почвы и более крупных структурных пор. Последние в основном формируются биологической активностью и обработкой почвы. Проблема анализа полученной сложной структуры заключается в том, что поры различного размера, формы и происхождения многократно соединены между собой и не могут быть разделены по категориям с использованием существующих показателей. В настоящее время есть два многообещающих подхода к решению этой проблемы:

1. Идентификация и сегментация структурных пор по их характерной форме. Эта дифференциация позволяет связать поры с процессами их образования. Одним из примеров являются структурные поры фитогенного происхождения, которые образуют плотную сеть пор цилиндрической формы (биопоры) [56, 58, 107]. Установлено, что разные способы обработки почвы приводят к образованию пор характерной формы [71, 72].

2. Использование иерархической схемы выборки и объединение информации из изображений из выборок разного размера (образцы почв различного объема) и разрешения для получения полного описания многомасштабной неоднород-

ности [7, 19, 29, 47, 91, 103]. Путем объединения распределения пор по размеру (PSD) нескольких размеров образцов [102] можно создать совместное распределение пор по размеру, увеличивая диапазон размеров видимой пористости.

В ряде исследований установлено, что биопоры довольно хорошо изолированы от пор иного происхождения. Это позволяет с высокой достоверностью их сегментировать и отделить от остального порового пространства. Авторами [107] представлена своя методика сегментации биопор.

**Исследование структуры почв и порового пространства с помощью корреляционных функций.** Для количественной характеристики трехмерной структуры почвы как геофизической среды и ее связности можно применять теорию локальной пористости [11], распределение пор по размерам, извилистость и другие параметры [57]. Однако все эти полезные характеристики лишь описывают разные аспекты структуры пористой среды, универсального дескриптора (под этим термином следует понимать количественный показатель, отражающий все необходимые признаки) порового пространства и структуры почвы на данный момент не существует. Чтобы описать структуру какого-либо объекта, в идеале ее необходимо математически представить в виде некоторой функции или набора параметров такой функции. Помимо существования такой постановки задачи, необходимо решать и обратную – восстанавливать структуру по ее функции, что обычно называется реконструкцией [45, 98].

Проверка возможности описания и восстановления порового пространства и структуры почвы по двухточечным корреляционным функциям методом “отжига” (simulated annealing, SA) представлена авторами соответствующей статьи [30]. Следует отметить, что исследование написано по результату анализа 2D изображений (сканированные шлифы), но вполне может быть применено для томографических срезов.

По итогам исследования из восьми типов порового пространства однотипное распределение пор по форме и ориентации в оригинальных и реконструированных изображениях наблюдалось только в двух случаях. По морфометрическим параметрам пор наиболее удачная реконструкция получена для массивной почвенной структуры с разрозненными порами округлой формы. Установлено, что проблемы с реконструкцией возникают из-за большого количества разно ориентированных пор-трещин. Таким образом, хотя на нынешнем этапе метод математической реконструкции порового пространства почвы далек от совершенства, его можно с успехом использовать для почв и пород с изометричными (в двумерных срезах) порами. Изометричные поры характерны для массивной структуры суглинистых почвообразующих пород с биогенными порами округлой формы и для комковатой структуры гумусовых горизонтов почвы с изометричными изрезанными порами упаковки комковатых агрегатов. Улучшение описания структуры и порового пространства почв и грунтов с помощью корреляционных функций можно развивать по трем направлениям: 1) совместного использования других типов функций (кластерной, линейной, хорды и др.), 2) разработки метода учета анизотропии и 3) использования многоточечных корреляционных функций [30].

В 2015 г. был разработан универсальный стохастический метод совмещения разномасштабных изображений на основе масштабируемых корреляционных функций в процессе работы над методом реконструкции с помощью корреляционных функций и оптимизации “имитацией отжига”. Метод потенциально может быть использован в любой научной и прикладной области, в том числе для получения изображений с так называемым *super resolution* (получением разрешения выше того, который предоставляет прибор) [27]. Коллективом авторов решена проблема сравнения двух почвенных структур на основе корреляционных функций, с помощью анализа вклада каждой корреляционной функции в оптимизационную функцию при решении обратной задачи стохастической реконструкции [27]. По результатам сравнения структур можно оценить статистическую однородность структуры порового пространства почвы [33, 34], что непосредственно связано с репрезентативностью ее структуры и множества физических свойств в исследуемом объеме вплоть до классических ненарушенных образцов. По данным параметризации корреляционных функций возможно сжатие информации о структуре почв и построение цифровой модели 3D строения любой иерархичности и сложности [48].

### МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ В АНАЛИЗЕ ОБЪЕМНЫХ СТРУКТУР НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВ

С появлением 3D анализа томографических данных возникла необходимость в разработке объемных показателей для оценки состояния почв. Изначально часть показателей была позаимствована из 2D анализа (анализа изображений) – общая пористость и количество объектов (пор) – и адаптирована для 3D структур. Но объемная структура очень сильно отличается от плоского изображения. В объеме поры связаны, и может возникнуть ситуация, когда общая пористость почвы по томографическим данным составляет более 50% в объеме 1 см<sup>3</sup>, а пора всего одна [94].

Со временем были разработаны и включены в программы для анализа томографических данных (например, STan) показатели *открытой и закрытой пористости*, где закрытая пористость – это доля совокупного объема обособленных пор в объеме образца, а открытая – доля совокупного объема пор, выходящая на поверхность [18]. Эти параметры бесполезны без привязки к объему, потому что чем больше объем – тем больше закрытая пористость. Но при этом их вполне допустимо использовать для объектов сопоставимого размера, например, для почвенных агрегатов одного фракционного размера.

С развитием 3D анализа сформировалось понятие локальной толщины объекта [15]. *Локальная толщина* – оценочный параметр, программно определяемый путем заполнения внутренней структуры объекта сферами. Способ расчета локальной толщины поры в 2D показан на рис. 2, в 3D программа анализирует максимально удаленные точки поры друг от друга, и через геометрический центр поры строит “скелетную” линию между ними, далее начинает заполнять внутренний объем сферами, где центр сферы расположен на скелетной линии, а край – ближайшая граница поры.

В результате формируется карта локальной толщины порового пространства, где объем порового пространства разделен на размерные фракции (доля объема, занятая сферами определенной размерной фракции). В некотором смысле этот показатель информативнее чем привычный “средний радиус поры”. Если трещиноватая пора в поперечном сечении представляет собой ломаную линию, то в объеме это плоскость, похожая на мятый лист бумаги разной толщины, а если она частично выходит за разрешение, то лист с отверстиями. Средний радиус в этом случае будет мало информативным, а локальная толщина покажет толщину поры и распределение объемов относительно толщины. Становится возможным построить объемную карту по локальной толщине любой рентген-контрастной фазы, например

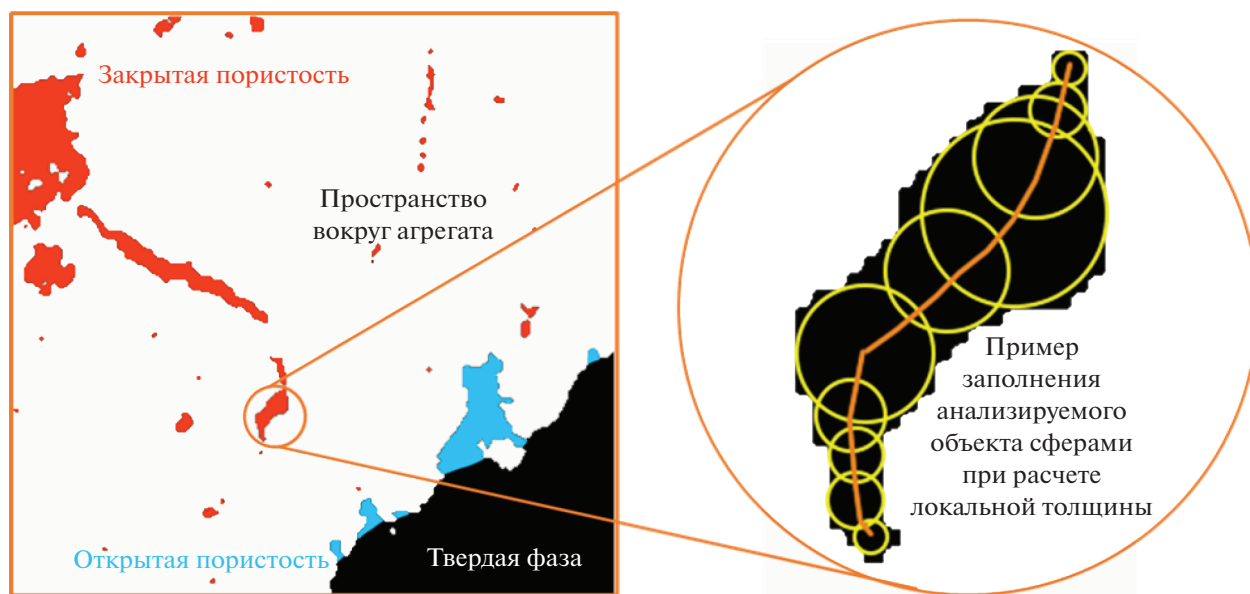


Рис. 2. Расчет локальной толщины объекта в 2D (по [106]).

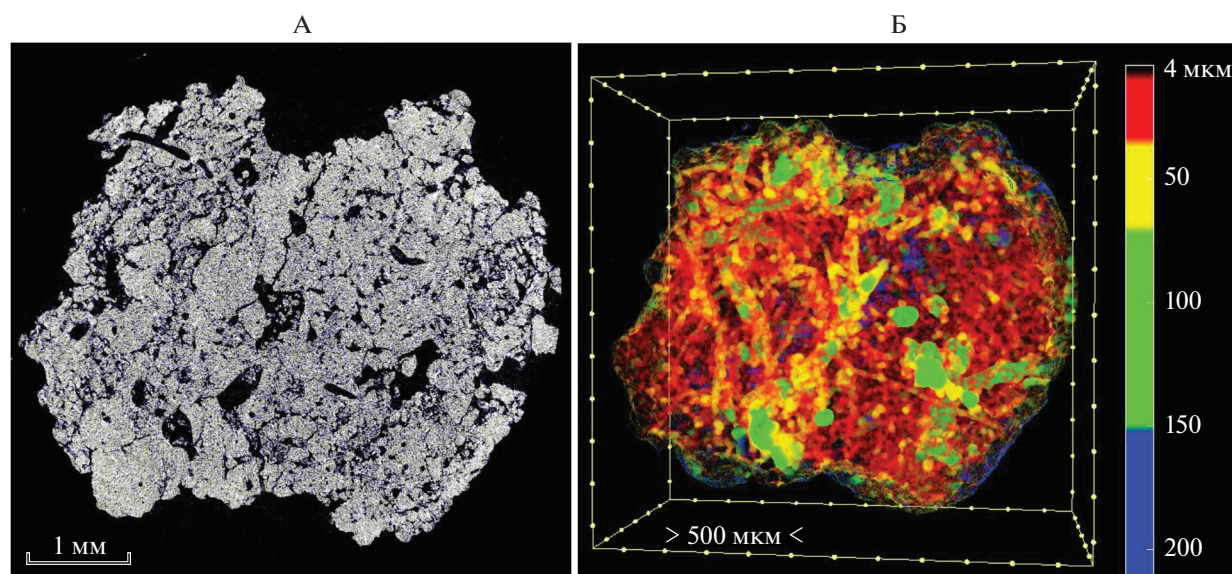


Рис. 3. Моделирование порового пространства агрегата чернозема типичного: А – томографический срез через центр образца (поры черные), Б – результат обработки и расчета локальной толщины пор в объеме агрегата (от предела разрешения до максимального по толщине объекта). Образец почвы предоставлен В.А. Холодовым, съемка, обработка и моделирование проведены К.Н. Абросимовым.

проросшего семени, минеральных зерен или структуры порового пространства внутри агрегата с очень высоким разрешением (рис. 3).

Локальная толщина как оценочный количественный показатель пока редко встречается в исследованиях, известно его применение для расчетов порового пространства серой лесной почвы Greyzemic Phaeozems Albic [84, 104] и агрегатов [106].

На почвенных образцах опробован метод численного анализа трехмерных томографических изображений на основе интегральной геометрии, топологии и морфологического анализа. Метод включает в себя расчет совокупного и некумулятивного распределения пор по размерам функционалов Минковского и чисел Бетти [43, 103].

Претерпели изменения и количественные показатели. Если возможно определить закрытую



пористость, то можно и подсчитать *количество закрытых пор*. А зная порог проницаемости жидкой воды и *локальную толщину* порового пространства при данном разрешении, можно оценить функциональную роль пор, например, в фильтрации или удержании воды. Одной из актуальных проблем анализа объемной структуры порового пространства стала оценка связности пор.

Связная объемная структура порового пространства может быть оценена с точки зрения параметров связности. *Связность порового пространства* – важный параметр, определяющий целостность и ненарушенность структуры порового пространства [77]. Связность может быть основой для определения воздухопроницаемости, так и на насыщенной гидравлической проводимости [59, 107]. Более того, взаимосвязь между различными классами пор также важна для почвы как среды обитания множества организмов, а также для доступности почвенного органического углерода (SOC) для этих организмов и их состояния аэрации [53, 64].

Один из наиболее часто используемых показателей связности порового пространства – число Эйлера-Пуанкаре (Euler number). Число Эйлера измеряет то, что можно было бы назвать “избыточной связностью” – степень, в которой части объекта многократно связаны [65]. Это мера того, сколько соединений в структуре можно разорвать, прежде чем она разделится на две отдельные части. (Топологически объект можно сжать в круг, а избыточные соединения выглядят как “ручки”.) Компонентами числа Эйлера являются три числа Бетти:  $\beta_0$  – количество несвязанных объектов (кластеров),  $\beta_1$  – количество избыточных соединений и  $\beta_2$  – количество закрытых полостей. Дается формула Эйлера-Пуанкаре для трехмерного объекта  $X$ :

$$\chi(X) = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2.$$

При вычислении числа Эйлера отдельного объекта  $\beta_0$  всегда будет 1. Значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будут определять число Эйлера отдельного объекта [101]. Количество закрытых полостей в почве обычно незначительно [102]. Если пренебречь  $\beta_2$ ,  $\chi$  становится отрицательным при условии, если количество избыточных соединений превышает количество несвязанных кластеров, и положительным, если наоборот. Для порового пространства со множеством связей число Эйлера будет отрицательным, а со множеством изолированных пор – положительным.

Число  $\chi$  – глобальный показатель, который может быть эффективно вычислен из частоты конфигураций локальных пикселей в пределах  $2 \times 2 \times 2$  воксельных окрестностей. Он не зависит от размера подключенных кластеров. Таким образом, отрицательный  $\chi$  не обязательно означает,

что существует связь на большом расстоянии через связанный кластер пор [80, 102].

Помимо числа Эйлера разработан безразмерный  $\Gamma$ -индикатор, который чувствителен к связи на большие расстояния, то есть его значение выше, если большая часть пористости принадлежит крупнейшему связанному кластеру [58, 80]:

$$\Gamma_p = \frac{1}{N_p^2} \sum_{k=1}^{N_i} n_k^2,$$

где  $N_p$  – количество всех вокселей пор  $p$ ,  $N_i$  – количество всех кластеров и  $n_k$  – количество вокселей пор в кластере  $k$ .  $\Gamma$  отражает вероятность того, что два случайно выбранных вокселя пор принадлежат одному и тому же кластеру пор, и на него сильно влияет самый большой кластер пор  $n_k$  [44]. Он может варьировать от 0 (много несвязанных кластеров) до 1, когда все воксели пор принадлежат одному связанному кластеру.  $\Gamma$  – индикатор, обычно увеличивается с увеличением пористости по  $s$ -образной кривой без четкого порога перколяции [80]. Наклон этой кривой отражает изменение размера связанных поровых кластеров, то есть это мера изменчивости перколяции между выборками набора данных [80]. Таким образом,  $\Gamma$  – индикатор отражает вероятность обнаружения непрерывного пути через систему пор, а  $\chi$  отражает количество внутренних соединений без учета их длины [40].

В работах последних 20 лет число Эйлера встречается практически всегда, когда объектом исследования является поровое пространство почвы, а критерием оценки состояния выбрана связность порового пространства [7, 43, 53, 64]. Последние разработки в области описания структуры пористых сред позволяют предположить, что функционалы Минковского могут быть успешно унифицированы с корреляционными функциями, так как являются их подмножеством [60, 61].

## ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ПОЧВ

**Метод “dual energy” и его возможности при анализе почв.** Dual energy (DECT) – это съемка одного и того же образца на двух разных энергиях рентгеновского источника. Например, 40 и 100 KeV. В DECT несколько рентгеновских спектров используются для характеристики затухания фотонов в зависимости от материала. Обработка таких данных позволяет увидеть то, что не видно на какой-либо одной энергии съемки.

Дело в том, что от перемены энергии съемки зависит количество рентген-контрастных фаз, которые мы наблюдаем. В почве множество глинистых минералов, поглощение рентгена у многих из них в большинстве случаев совпадает, в результате чего на томографических срезах они представлены од-

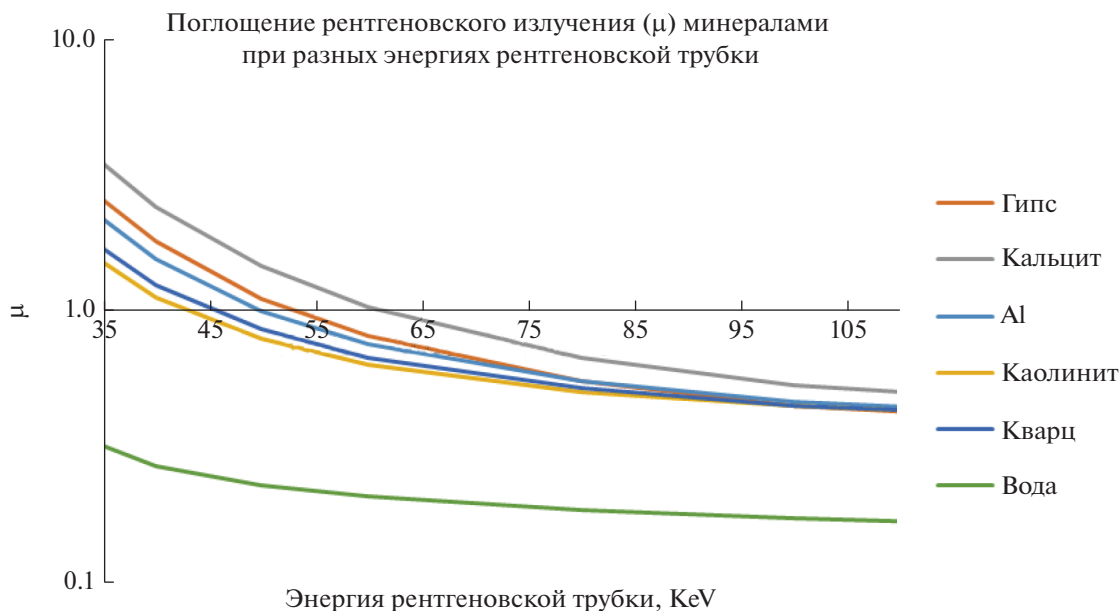


Рис. 4. Распределение элементов по яркости в зависимости от коэффициента поглощения на фоне поглощения воды. График построен на основе БД “MuCalcTool” для минералов и горных пород.

ной градацией серого, но есть и различия (рис. 4). Например, при энергии съемки 40 кэВ большинство глинистых минералов и элементов, присутствующих на графике, будут различимы между собой, и будут представлены своей градацией серого. При этом на 100 кэВ останется только поровое пространство с водой и кальцит. Остальные элементы сольются в одну градацию серого.

Оставить одну, более низкую энергию — это не всегда правильное решение. Есть минералы, которые на графике при разных энергиях могут меняться местами, градации серого на 40 и 100 кэВ фактически останутся теми же, но при этом будут соответствовать уже разным элементам. Зная этот факт, можно выбрать съемку на энергии, где градации серого этих минералов будут неразличимы в качестве фоновых данных. Далее после обработки стеков данных можно будет сделать распределение в образце каждого из элементов с высокой точностью.

В медицине метод “dual energy” считается новым и революционным [96]. В почвоведении он применяется редко и довольно давно. Известно, что этим методом можно рассчитать плотность почвы и содержание воды в ней [12, 17]. Потенциально методика может позволять решать обратную задачу и восстанавливать количество фазы в каждом вокселе [100, 105], однако применение таких технологий для анализа почв может быть затруднительно ввиду значительной их химической неоднородности. Метод “dual energy” открывает возможности для разработки контрастирования

слабо видимых при определенных энергиях рентген-контрастных фаз.

**Совмещение данных FIB-SEM и компьютерной томографии.** Совмещение методов компьютерной томографии и электронной микроскопии — перспективное направление. С учетом малых размеров объекта исследования томографические данные на пределе разрешения можно совместить с результатами сканирующего электронного микроскопа с ионной колонной (FIB-SEM). Такое исследование проводилось в 2020 г., где совмещены данные компьютерной томографии по площади 50  $\mu\text{m}^2$  [31]. Разрешение томографических данных составило 1  $\mu\text{m}$ , FIB-SEM — до 2.5 нм.

Полученные данные могут быть полезны для характеристики распределения пор по размерам, в диапазоне от 2.5 нм до ~1  $\mu\text{m}$ . Отмечены 3 основных типа нанопористости: один возникает между зернами минералов и органо-минеральными комплексами, другой — в органическом веществе, а третий — в минералах. Пока такой метод обладает рядом серьезных недостатков: малым размером (объемом) исследуемой области, следовательно, низкой репрезентативностью, отсутствием методов обработки изображений FIB-SEM, особенно для сегментирования пор, высокой стоимостью исследования, повреждениями, возникающими при фрезеровке образца для FIB-SEM, и криообработке и др.

Есть и достоинства его применения. Происходит детализация пор и дифференциация материалов путем локального зондирования химического состава, а также числовое моделирование нано-

масштабных процессов (потоков, микробной активности и т. д.) [31].

**Возможности нейросетей при обработке и анализе томографических данных.** Существенной трудностью, свойственной любому методу анализа изображений (томографического среза, фотоснимка шлифа, РЭМ-изображения и др.), является необходимость подбора пороговых значений для разделения составляющих образец материалов, иначе называемая сегментацией. Как отмечено выше, пиксели/воксели на границах фаз часто *содержат* в себе несколько материалов. Для сегментации изображений разработано множество различных комплексных методов и автоматических алгоритмов [66, 67, 89], однако многообразие методов не сказывается положительно на их результативности.

В последние годы широкое применение в области обработки изображений нашли нейросетевые технологии. Современные подходы к локальной сегментации могут предоставить достоверные данные для обучения нейронной сети сегментации томографических изображений. В исследовании [54] авторами использована гибридная архитектура U-net + ResNet-101, а в качестве тестовой сегментации – 7 томографических изображений почвы. Обучение выполнено путем исключения сегментированного изображения из наборов данных для обучения и проверки. Точность сегментирования оценивалась с использованием стандартных показателей компьютерного зрения (точности, отзыва, пересечения по объединению или IoU) и моделирования в масштабе пор для расчета проницаемости полученных трехмерных двоичных изображений почвы. В зависимости от образца грунта погрешность сегментирования по расчетным гидравлическим свойствам варьировала от 5 до 130%. Хотя метод синтетической томографии еще недостаточно надежен, чтобы предоставить достоверные данные, смоделированные с необходимым физическим реализмом, методология, предложенная в этой статье, применима для решения ряда практических задач:

– Имея большой набор обучающих данных из томографических изображений, можно построить сверточную нейронную сеть (convolutional neural networks – CNN), которая будет сегментировать данные компьютерной томографии почв намного быстрее, чем известные методы типа кригинга или схождения активных контуров, требующие больших вычислительных затрат, и без вмешательства операторов.

– Методологию CNN можно обучить сегментированию изображений FIB-SEM структуры почвы в наномасштабе [31], где традиционные методы сегментации для томографических изображений неприменимы [54].

**Возможности открытых кодов и программного обеспечения для проведения моделирования физических свойств почвы по данным о ее строении.** После того как 3D изображения разделены на фазы, в простейшем случае поры и твердое вещество, эту информацию можно использовать для моделирования физических свойств, в том числе гидравлических и транспортных характеристик. Все подобные методики можно условно разделить на два класса – прямые модели и упрощенные алгоритмы. К первым относятся методики решения уравнений Навье-Стокса для моделирования одно- и двухфазной фильтрации флюидов в порах. Среди наиболее популярных прямых методов: 1) решеточный метод Больцмана LBM [50, 75], 2) метод конечных элементов FEM, конечных объемов FVM и объема жидкости VoF [78, 10], 3) гидродинамика сглаженных частиц SPH [41], 4) решатели на основе конечных разностей FDM для уравнений Лапласа и Стокса [32, 86], 5) метод уровней level set [76], 6) метод фазового поля phase-field или функционал плотности [20, 81]. Однако все перечисленные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает размер области моделирования, в которой можно проводить вычисления, до ограниченного объема, обычно до  $\sim 700^3$  вокселей. Вычисления для таких небольших доменов, даже с использованием HPC ресурсов, легко достигает нескольких недель со значительным распараллеливанием на сотни вычислительных ядер. Трата вычислительных ресурсов и длительность расчетов исключают возможность работы с репрезентативными объемами REV почвы, а также с совмещенными изображениями. Единственным практическим вариантом является использование не прямых методов моделирования, таких как поросетевые (pore-network, PNM) модели [24–26], которые на самом деле могут быть эффективно параметризованы с помощью прямого моделирования масштаба пор любым вышеперечисленным методом(ами) [62, 79]. Хотя PNM позволяют проводить эффективные вычисления для моделирования одно-, двух- и трехфазной фильтрации, для их использования сначала необходимо извлечь поросетевую модель из трехмерного изображения [8, 34]. В настоящее время существует целый набор открытых кодов и свободного программного обеспечения для проведения как прямого, так и непрямого моделирования в поросетевых моделях: решение уравнения Стокса FDMSS [32] или решение для неньютоновских флюидов [21], модули к OpenFOAM для прямого моделирования одно- и двухфазных потоков [78], библиотеки для выделения поросетевых моделей PoreSpy и расчетов в них OpenPNM [36–38]. При этом выделение поросетевой модели из 3D изображения позволяет проводить более точный анализ распределения пор по раз-

мерам, чем на основе простых морфологических методик, описанных выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа публикаций по томографическим исследованиям в области почвоведения, можно определить пути развития метода компьютерной томографии:

1. Дальнейшее развитие приборной и аналитической базы позволит в ближайшей перспективе получать качественные томографические данные сверхвысокого разрешения.

2. Разработка сегментации на основе самообучающихся нейросетей в случае успеха позволит создать сервис “умной” сегментации данных. Это не отменит ручную сегментацию и существующие алгоритмы везде и сразу, но позволит пройти одно из “узких мест” томографии почв, где высок человеческий фактор, и в перспективе послужит основой для экспресс-анализа структуры почвы на основе томографических данных.

3. База знаний о структуре и поровом пространстве почвах дополнится новыми исследованиями из самых разных регионов мира. Несколько лет назад опробован опыт мультимасштабных исследований почвы, это шаг к комплексному подходу исследования всего почвенного профиля, а, возможно, и к математическому описанию структуры почвы на региональном уровне с прогнозированием и оценкой рисков.

4. Совершенствование расчетных методов. Существует множество программ для визуализации данных и фильтров для томографических изображений с открытым кодом, ничем не уступающие по функционалу коммерческим образцам [54], но часто без “дружелюбного” интерфейса. Не исключено появление программных пакетов, частично или полностью созданных для анализа почвенных изображений, по аналогии с уже существующим SoilJ (плагин для ImageJ) [52], в том числе для моделирования потока жидкости в почве.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева при финансовой поддержке РНФ, проект 19-74-10070.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 71. С. 65–79.
2. Скворцова Е.Б., Калинина Н.В. Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1114–1125.
3. Толковый словарь по почвоведению / Под ред. А.А. Роде. М.: Наука, 1975.
4. Abrosimov K.N., Gerke K.M., Semenov I.N., Korost D.V. Application of the Otsu Algorithm for Segmentation of Pore Space in Soils Based on Tomographic Data // Eurasian Soil Sci. 2021. Т. 54. № 4. P. 560–571. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040037>
5. Anderson S.H., Gantzer C.J. Determination of soil water content by X-ray computed tomography and magnetic resonance imaging // Irrigation Sci. 1989. V. 10. № 1. P. 63–71.
6. Aylmore L.A.G., Hainsworth J.M. The use of computed assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content // Australian J. Soil Res. 1983. V. 21. P. 435–443.
7. Bacq-Labreuil A., Crawford J., Mooney S.J., Neal A.L., Akkari E., McAuliffe C., Ritz K. Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture // Geoderma. 2018. V. 332. P. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.002>
8. Baychev T.G., Jivkov A.P., Rabbani A., Raeini A.Q., Xiong Q., Lowe T., Withers P.J. Reliability of Algorithms Interpreting Topological and Geometric Properties of Porous Media for Pore Network Modelling // Transport in Porous Media. 2019. V. 128. P. 271–301.
9. Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V., Kolupaeva V.N., Korost D.V., Khomyak A.N. Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography // Open Agriculture. 2020. V. 5. P. 888–897. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0080>
10. Bilger C., Aboukhedr M., Vogiatzaki K., Cant R.S. Evaluation of two-phase flow solvers using Level Set and Volume of Fluid methods // J. Comput. Phys. 2017. V. 345. P. 665–686.
11. Biswal B., Manwart C., Hilfer R. Three-Dimensional Local Porosity Analysis of Porous Media // Physica A (Amsterdam). 1998. V. 255. P. 221–241.
12. Braz D., Lopes R.T., Motta L.M.G. Dual-energy computerized tomography in compacted soil // Geotechnical and Geological Eng. 2000. V. 18. P. 221–238.
13. Capowiez Y., Pierret A., Monestiez P., Belzunces L. Evolution of burrow systems after the accidental introduction of a new earthworm species into a Swiss pre-alpine meadow // Biol. Fertil. Soils. 2000. V. 31. P. 494–500.
14. Capowiez Y., Sammartino S., Michel E. Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores // Geoderma. 2011. V. 162. P. 124–131.

15. *Chiang Martin Y.M., Landis F.A., Xianfeng Wang, Smith J.R., Cicerone M.T., Dunkers J., Luo Yanfeng* Local Thickness and Anisotropy Approaches to Characterize Pore Size Distribution of Three-Dimensional Porous Networks // *Tissue Eng. Part C: Methods*. 2009. P. 65–76.  
<https://doi.org/10.1089/ten.tec.2008.0298>
16. *Cormack A.* Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34. Is. 9. P. 2722–2727.
17. *Crestana S.* Water Physics Study on Soil Using Computerized Tomography (in Portuguese). Ph.D. Thesis. USP. São Carlos, São Paulo, 1985. P. 151.
18. CTan Usermanual: Morphometric parameters measured by Skyscan™ CT-analyser software, 2013.
19. *Dal Ferro N., Sartori L., Simonetti G., Berti A., Morari F.* Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth // *Soil Till. Res.* 2014. V. 140. P. 55–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.003>
20. *Demianov A., Dinariev O., Evseev N.* Density functional modelling in multiphase compositional hydrodynamics // *Can. J. Chem. Eng.* 2011. V. 89(2). P. 206–226.
21. *Eichheimer P., Thielmann M., Popov A., Golabek G.J., Fujita W., Kottwitz M. O., Kaus B.J.* Pore-scale permeability prediction for Newtonian and non-Newtonian fluids // *Solid Earth*. 2019. V. 10(5). P. 1717–1731.
22. *Elliot T.R., Heck R.J.* A comparison of optical and X-ray CT technique for void analysis in soil thin section // *Geoderma*. 2007. V. 141. P. 60–70.
23. *Elliott E.T., Coleman D.C.* Let the soil work for us // *Ecological Bull.* 1998. V. 39. P. 23–32.
24. *Fatt I.* The network model of porous media I. Capillary pressure // *Transactions of the AIME*. 1956. V. 207. P. 144–159.
25. *Fatt I.* The network model of porous media II. Dynamic properties of a single size tube network // *Transactions of the AIME*. 1956. V. 207. P. 160–163.
26. *Fatt I.* The network model of porous media III. Dynamic properties of networks with tube radius distribution // *Transactions of the AIME*. 1956. V. 207. P. 164–181.
27. *Gerke K.M., Karsanina M.V.* Improving stochastic reconstructions by weighing correlation functions in an objective function // *EPL (Europhysics Letters)*. 2015. V. 111(5). P. 56002.  
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/111/56002>
28. *Gerke K.M., Karsanina M.V.* How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: Pore-scale modelling and stationarity analysis // *European J. Soil Sci.* 2020.  
<https://doi.org/10.1111/ejss.13055>
29. *Gerke K.M., Karsanina M.V., Mallants D.* Universal stochastic multi-scale image fusion: An example application for shale rock // *Scient. Rep.* 2015. V. 5. P. 15880.  
<https://doi.org/10.1038/srep15880>
30. *Gerke K.M., Karsanina M.V., Skvortsova E.B.* Description and reconstruction of the soil pore space using correlation functions // *Eurasian Soil Sc.* 2012. V. 45. P. 861–872.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229312090049>
31. *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*. 2021. V. 383. P. 114739.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114739>
32. *Gerke K.M., Skvortsova E.B., Korost D.V.* Tomographic method of studying soil pore space: Current perspectives and results for some Russian soils // *Eurasian Soil Sci.* 2012. V. 45. № 7. P. 700–709.
33. *Gerke K.M., Sizonenko T.O., Karsanina M.V., Lavrukhin E.V., Abashkin V.V., Korost D.V.* Improving watershed-based pore-network extraction method using maximum inscribed ball pore-body positioning // *Adv. Water Resour.* 2020. P. 103576.
34. *Gerke K.M., Vasilyev R.V., Khirevich S., Karsanina M.V., Collins D., Sizonenko T., Korost D.V., Lamontagne S., Mallants D.* Finite-difference method Stokes solver (FDMSS) for 3D pore geometries: Software development, validation and case studies // *Computers Geosciences*. 2018. V. 114. P. 41–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.01.005>
35. *Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Tagiverdiev S.S., Morozov I.V., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B.* Physical properties of soils in Rostov agglomeration // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. № 8. P. 898–907.
36. *Gostick J.T., Khan Z.A., Tranter T.G., Kok M.D., Agnaou M., Sadeghi M., Jervis R.* PoreSpy: A python toolkit for quantitative analysis of porous media images // *J. Open Source Software*. 2019. V. 4(37). P. 1296.
37. *Gostick J.T.* Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation // *Phys. Review E*. 2017. V. 96(2).
38. *Gostick J., Aghighi M., Hinebaugh J., Tranter T., Hoeh M.A., Day H., Putz A.* OpenPNM: a pore network modeling package // *Computing in Sci. Engineering*. 2016. V. 18(4). P. 60–74.
39. *Hea Z., Zhanga S., Tenga J., Yaoc Y., Sheng D.* A coupled model for liquid water-vapor-heat migration in freezing soils Cold Regions // *Sci. Tech.* 2018. V. 148. P. 22–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.01.003>
40. *Herring A.L., Andersson L., Schlüter S., Sheppard A., Wildenschild D.* Efficiently engineering pore-scale processes: The role of force dominance and topology during nonwetting phase trapping in porous media // *Adv. Water Res.* 2015. V. 79. P. 91–102.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.02.005>
41. *Holmes D.W., Williams J.R., Tilke P., Leonardi C.R.* Characterizing flow in oil reservoir rock using SPH: Absolute permeability // *Computational Particle Mechanics*. 2016. V. 3. P. 141–154.  
<https://doi.org/10.1007/s40571-015-0038-7>
42. *Hounsfield G.N.* Computerized transverse axial scanning (tomography). Description to system // *Br. J. Radiol.* 1973. V. 46. P. 1016–1022.
43. *Ivonin D., Kalnin T., Grachev E., Shein E.* Quantitative analysis of pore space structure in dry and wet soil by integral geometry methods // *Geosciences*. 2020. V. 10(9). P. 365–365.

44. *Jarvis N., Larsbo M., Koestel J.* Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography // *Geoderma*. 2017. V. 287. P. 71–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.026>
45. *Jiao Y., Stillinger F.H., Torquato S.* Modeling Heterogeneous Materials via Two-Point Correlation Functions: Basic Principles // *Phys. Rev.* 2007. V. 76. P. 031110.
46. *Joschko M., Graff O., Müller P.C., Kotzke K., Lindner P., Pretschner D.P., Larink O.* A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm // *Biol. Fertil. Soils*. 1991. V. 11. P. 88–92.
47. *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.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.055>
48. *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. 0126515.
49. *Karsanina M.V., Lavrukhin E.V., Fomin D.S., Yudina A.V., Abrosimov K.N., Gerke K.M.* Compressing soil structural information into parameterized correlation functions // *Eur. J. Soil Sci.* 2020.  
<https://doi.org/10.1111/ejss.13025>
50. *Khirevich S., Ginzburg I., Tallarek U.* Coarse-and fine-grid numerical behavior of MRT/TRT lattice-Boltzmann schemes in regular and random sphere packings // *J. Computational Physics*. 2015. V. 281. P. 708–742.
51. *Koebnick N., Daly K.R., Keyes S.D., George T.S., Brown L.K., Raffan A., Cooper L.J., Naveed M., Bengough A.G., Sinclair I., Hallett P.D., Roose T.* High-resolution synchrotron imaging shows that root hairs influence rhizosphere soil structure formation // *The New phytologist*. 2017. V. 216(1). P. 124–135.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14705>
52. *Koestel J.* Soil: An Image plugin for the semiautomatic processing of three-dimensional X-ray images of soils // *Vadose Zone J.* 2018. V. 17. Is. 1. P. 170062.
53. *Kravchenko A.N., Negassa W.C., Guber A.K., Rivers M.L.* Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 291.  
<https://doi.org/10.1038/srep16261>
54. *Lavrukhin E.V., Gerke K.M., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V.* Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil XCT images based on pore-scale modelling of saturated flow properties // *Soil and Tillage Res.* 2021. V. 209(15). P. 104942.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104942>
55. *Lebedeva M.P., Golovanov D.L., Shishkov V.A., Ivanov A.L., Abrosimov K.N.* Microscopic and tomographic studies for interpreting the genesis of desert varnish and the vesicular horizon of desert soils in Mongolia and the USA // *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2019. V. 71. № 1. P. 21–42.
56. *Leue M., Uteau-Puschmann D., Peth S., Nellesen J., Kodešová R., Gerke H.H.* Separation of soil macropore types in three-dimensional x-ray computed tomography images based on pore geometry characteristics // *Vadose Zone J.* 2019. V. 18. P. 1–13.  
<https://doi.org/10.2136/vzj2018.09.0170>
57. *Lindquist W.B., Lee S.-M., Coker D.A., Jones K.W., Spanne P.* Medial Axis of Void Structure in Three-Dimensional Tomographic Images of Porous Media // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 8297–8310.
58. *Lucas M., Schlüter S., Vogel H.-J., Vetterlein D.* Soil structure formation along an agricultural chronosequence // *Geoderma*. 2019. V. 350. P. 61–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.041>
59. *Luo L., Lin H., Li S.* Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography // *J. Hydrol.* 2010. V. 39(1–2). P. 53–64.
60. *Ma Z., Torquato S.* Precise algorithms to compute surface correlation functions of two-phase heterogeneous media and their applications // *Phys. Rev. E.* 2018. V. 98(1). P. 013307.
61. *Ma Z., Torquato S.* Generation and structural characterization of Debye random media // *Phys. Rev. E.* 2020. V. 102(4). P. 043310.
62. *Miao X., Gerke K.M., Sizonenko T.O.* A new way to parameterize hydraulic conductances of pore elements: A step towards creating pore-networks without pore shape simplifications // *Adv. Water Resources*. 2017. V. 105. P. 162–172.
63. *Mooney S.J., Pridmore T.P., Helliwell J., Bennett M.J.* Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3D root systems architecture in soil // *Plant and Soil*. 2012. V. 352(1–2). P. 1–22.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-011-1039-9>
64. *Negassa W.C., Guber A.K., Kravchenko A.N., Marsh T.L., Hildebrandt B., Rivers M.L.* Properties of soil pore space regulate pathways of plant residue decomposition and community structure of associated bacteria // *PLoS One*. 2015. V. 10. P. e0123999.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123999>
65. *Odgaard A., Gundersen H.J.* Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions // *Bone*. 1993. V. 14(2). P. 173–182.
66. *Oh W., Lindquist B.* Image thresholding by indicator kriging *IEEE Trans. Pattern // Anal. Mach. Intell.* 1999. V. 21. P. 590–602.
67. *Otsu N.* *IEEE Trans Sys. Man // Cyber: journal* 9. 1979. P. 62–68.  
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
68. *Pagliai M., Vignozzi N.* Soil pore system as an indicator of soil quality // *Advances in GeoEcology*. 2002. V. 35. P. 71–82.
69. *Petrovic A.M., Siebert J.E., Rieke P.E.* Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning // *Soil Sc. Soc. Am. J.* 1982. V. 46(3). P. 445–450.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600030001x>
70. *Peyton R.L., Haeffner B.A., Anderson S.H., Gantzer C.J.* Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores // *Geoderma*. 1992. V. 53. Iss. 3–4. P. 329–340.
71. *Pires L.F., Borges J.A.R., Rosa J.A., Cooper M., Heck R.J., Passoni S., Roque W.L.* Soil structure changes induced

- by tillage systems // *Soil Till. Res.* 2017. V. 165. P. 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>
72. Pires L.F., Roque W.L., Rosa J.A., Mooney S.J. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography // *Soil Till. Res.* 2019. V. 191. P. 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.018>
  73. Pogosyan L., Abrosimov K., Romanenko K., Marquez J., Sedov S. How is the fragipan incorporated in the pore space architecture of a boreal retisol? // *Soil Res.* 2019. V. 57(6). P. 566–574. <https://doi.org/10.1071/SR18239>
  74. Pogosyan L., Gastelum A., Prado B., Marquez J., Abrosimov K., Romanenko K., Sedov S. Morphogenesis and quantification of the pore space in a tephra-palaeosol sequence in Tlaxcala, central Mexico // *Soil Res.* 2019. V. 57(6). P. 559–565. <https://doi.org/10.1071/SR18185>
  75. Pot V., Zhong X., Baveye P.C. Effect of resolution, reconstruction settings, and segmentation methods on the numerical calculation of saturated soil hydraulic conductivity from 3D computed tomography images // *Geoderma.* 2020. V. 362. P. 114089.
  76. Prodanović M., Bryant S.L. A level set method for determining critical curvatures for drainage and imbibition // *J. Colloid Interface Sci.* 2006. V. 304(2). P. 442–458.
  77. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: a review // *Geoderma.* 2018. V. 314. P. 122–137.
  78. Raeini A.Q., Bijeljic B., Blunt M.J. Generalized network modeling: Network extraction as a coarse-scale discretization of the void space of porous media // *Physical Rev. E.* 2017. V. 96(1). P. 013312.
  79. Raeini A.Q., Blunt M.J., Bijeljic B. Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method // *J. Computational Phys.* 2012. V. 231. P. 5653–5668.
  80. Renard P., Allard D. Connectivity metrics for subsurface flow and transport // *Advances in Water Res.* 2013. V. 51. P. 168–196. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.12.001>
  81. Rokhforouz M.R., Akhlaghi Amiri H.A. Phase-field simulation of counter-current spontaneous imbibition in a fractured heterogeneous porous medium // *Phys. Fluids.* 2017. V. 29(6). P. 062104.
  82. Romanenko K.A., Skvortsova E.B., Rozhkov V.A. Form and orientation of soil pores as indicators of a structural soil organization // *IOP Conf. Ser.: Earth and Env. Sci.* 2019. V. 368. P. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012041>
  83. Romanenko K.A., Rogov V.V., Yudina A.V., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Kurchatova A.N. Frozen soils and sediments microstructure x-ray tomography study: methods, approaches, perspectives // *Dokuchaev Soil Bull.* 2016. V. 83. P. 103–117. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-103-117>
  84. Romanis T., Sedov S., Lev S., Lebedeva M., Kondratev K., Yudina A., Abrosimov K., Golyeva A., Volkov D. Landscape change and occupation history in the central Russian upland from upper palaeolithic to medieval: Paleopedological record from Zaraysk kremlin // *Catena.* 2021. V. 196.104873. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104873>
  85. Rozhkov V.A. *Soil Informatics.* M.: Agropromizdat, 1989. 200 p.
  86. Sahabro V., Torres-Verdín C., Javadpour F., Sepehrnoori K. Finite-difference approximation for fluid-flow simulation and calculation of permeability in porous media // *Transport in Porous Media.* 2012. V. 94. P. 775–793. <https://doi.org/10.1007/s11242-012-0024-y>
  87. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // *Geoderma.* 2015. P. 237–238. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003>
  88. Sasov A.Y. The investigation of the microstructure of soils by computerised tomography // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. Geologiya.* 1987. V. 3. P. 56–62.
  89. Schlüter S., Großmann C., Diel J., Wu G.-M., Tischer S., Deubel A., Rücknagel J. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties // *Geoderma.* 2018. V. 332. P. 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>
  90. Schlüter S., Weller U., Vogel H.J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks // *Comp. and Geosciences.* 2010. V. 36. P. 1246–1251.
  91. Schlüter S., Weller U., Vogel H.-J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment // *J. Plant Nutrition and Soil Sc.* 2011. V. 174. P. 395–403. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000103>
  92. Shein E.V., Skvortsova E.B., Dembovetskii A.V., Abrosimov K.N., Il'in L.I., Shnyrev N.A. Pore-size distribution in loamy soils: A comparison between microtomographic and capillarimetric determination methods // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. P. 315–325. <https://doi.org/10.1134/S1064229316030091>
  93. Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Gerke K.M., Korost D.V., Romanenko K.A., Belokhin V.S., Dembovetskii A.V. Tomography in soil science // *Dokuchaev Soil Bull.* 2016. V. 86. P. 28–34. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-28-34>
  94. Sorokin A.S., Abrosimov K.N., Lebedeva M.P., Kust P.G. Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. P. 326–337. <https://doi.org/10.1134/S1064229316030108>
  95. Suzdaleva A.V., Shein E.V., Verkhovtseva N.V., Abrosimov K.N. Physical and microbiological aspects of the soil seedbed in the early formation of the barley root system (*Hordeum vulgare* L.): tomographic studies // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 941. 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/941/1/012032>
  96. Tan C.O., Kuppens D., Gupta R. *Dual-Energy CT. Neuroimaging Techniques in Clinical Practice.* Springer, Cham, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48419-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48419-4_7)

97. *Tollner E.W., Murphy C.* Factors affecting soil x-ray absorption coefficients with computer tomography // *Am. Soc. Agricultural Eng.* 1991. V. 34(3). P. 1047–1053.
98. *Torquato S.* Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties. Springer-Verlag. N.Y., 2002.
99. *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.
100. *Victor R.A., Prodanović M., Torres-Verdín C.* Monte Carlo approach for estimating density and atomic number from dual-energy computed tomography images of carbonate rocks // *J. Geophysical Res.: Solid Earth.* 2017. V. 122(12). P. 9804–9824.
101. *Vogel H.-J.* Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections // *European J. Soil Sc.* 1997. V. 48. P. 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x>
102. *Vogel H.-J.* Topological characterization of porous media // *Morphology of condensed matter: Physics and geometry of spatially complex systems.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 75–92.
103. *Vogel H.-J., Weller U., Schlüter S.* Quantification of soil structure based on Minkowski functions // *Comp. Geosci.* 2010. V. 36. P. 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.007>
104. WRB. 2014. 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.
105. *Yang Y.S., Liu K.Y., Mayo S., Tulloh A., Clennell M.B., Xiao T.Q.* A data-constrained modelling approach to sandstone microstructure characterization // *J. Petroleum Sci. Eng.* 2013. V. 105. P. 76–83.
106. *Yudina A.V., Romanenko K.A.* Mechanistic Understanding of Soil Hierarchical Structure, EGU General Assembly 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26167.16809>
107. *Zhang Z., Liu K., Zhou H., Lin H., Li D., Peng X.* Three-dimensional characteristics of biopores and non-biopores in the subsoil respond differently to land use and fertilization // *Plant and Soil.* 2018. V. 428. P. 453–467. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3689-3>

## Tomography in Soil Science: from the First Experiments to Modern Methods (Review)

**K. N. Abrosimov<sup>1,\*</sup>, K. M. Gerke<sup>2</sup>, D. S. Fomin<sup>1</sup>, K. A. Romanenko<sup>1</sup>, and D. V. Korost<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\*e-mail: [abrosimov\\_kn@esoil.ru](mailto:abrosimov_kn@esoil.ru)

The article provides an overview of the use of computed tomography method in the study of soils from the first works to the present time. The purpose of the article is to trace the development of the computed tomography method in the field of hardware and methods for processing tomographic data. From the first attempts to analyze soil structure using tomographic sections of low quality to modern methods of segmentation and analysis of volumetric structures using specialized software, correlation functions and neural networks. The purpose of the article is to show the possibilities of application and determine the development trends of methods for processing tomographic data in the field of studying and analyzing soil structure. The article presents examples from the world experience of using computed tomography for a broad variety of soils, shows various methods of data segmentation that have been used from the first studies to the recent ones. The specific terminology that developed within the framework of the evolution of the method and various morphometric indicators for 2D and 3D images, developed or being developed at the moment, are presented, a forecast of the prospects for the method in the near future is given.

*Keywords:* XCT, image analysis, pore space, soil structure, tomographic studies, mCT